

Table des matières

I	Commande en temps continu	1
1	Modélisation dynamique des procédés	3
1.1	Références	3
1.2	Intérêt de la commande des procédés	3
1.3	Description d'un procédé du point de vue de l'automaticien	4
1.4	Classification des modèles	7
1.5	Représentation d'état	8
1.6	Exemples de modèles en génie des procédés	9
1.6.1	Systèmes à paramètres localisés	9
1.6.2	Procédés à paramètres distribués	17
1.6.3	Degrés de liberté	25
1.7	Stabilité des procédés	26
1.8	Ordre d'un procédé	26
1.9	Transformation de Laplace	27
1.9.1	Linéarisation et variables d'écart	28
1.9.2	Quelques propriétés de la transformation de Laplace	29
1.9.3	Fonctions de transfert	32
1.9.4	Pôles et zéros d'une fonction de transfert	40
1.9.5	Analyse qualitative de la réponse d'un système	40
1.10	Systèmes linéaires dans l'espace d'état	43
1.10.1	Cas général	43
1.10.2	Représentation analogique	45
1.11	Comportement dynamique de procédés simples	47
1.11.1	Systèmes de premier ordre	47
1.11.2	Systèmes intégrateurs	48
1.11.3	Systèmes de second ordre	50
1.11.4	Systèmes d'ordre supérieur	54
1.11.5	Identification de modèles continus de procédés	61
2	Commande linéaire à contre réaction	69
2.1	Conception d'une boucle de contre réaction	69
2.1.1	Diagramme de blocs de la boucle de contre réaction	69
2.1.2	Types généraux de régulateurs	71
2.1.3	Organes de mesures : capteurs	73
2.1.4	Lignes de transmission	74
2.1.5	Actionneurs	74
2.2	Diagramme de blocs, graphes de fluence, règles de calcul	76
2.3	Dynamique des procédés commandés par contre réaction	84

2.3.1	Etude des différentes actions	88
2.3.2	Influence de l'action proportionnelle	88
2.3.3	Influence de l'action intégrale	92
2.3.4	Influence de l'action dérivée	95
2.3.5	Résumé des caractéristiques des régulateurs	99
3	Analyse de stabilité	105
3.1	Cas d'un système défini par sa fonction de transfert	105
3.2	Analyse dans l'espace d'état	106
3.2.1	Analyse d'un système linéaire dans l'espace d'état	106
3.2.2	Analyse générale pour un système continu non linéaire	107
3.2.3	Cas d'un système continu linéaire	112
3.2.4	Cas d'un système continu non linéaire: le réacteur de polymérisation	114
3.3	Analyse de stabilité des systèmes à rétroaction	119
3.3.1	Critère de Routh-Hurwitz	120
3.3.2	Analyse du lieu des racines	122
3.3.3	Méthode fréquentielle	126
4	Synthèse des régulateurs par bouclage	129
4.1	Critères de performance	129
4.2	Caractéristiques de la réponse transitoire	130
4.3	Critères d'intégrale d'erreur et conception de la commande	132
4.4	Choix du régulateur PID	133
4.4.1	Remarques générales	133
4.4.2	Recommandations	134
4.5	Réglage des régulateurs PID	136
4.5.1	Réglage par essai-erreur	136
4.5.2	Méthode d'oscillation entretenue	136
4.5.3	Méthode d'oscillation par relais	137
4.5.4	Méthode de la courbe de réaction du procédé	142
4.5.5	Réglage de Tavakoli et Fleming pour les régulateurs PI	145
4.5.6	Réglage robuste pour régulateurs PID	145
4.6	Amélioration des PID	146
4.6.1	Régulateur PID avec action dérivée sur la sortie mesurée	146
4.6.2	Utilisation d'une trajectoire de référence	147
4.6.3	Régulateur PID discrétisé	148
4.6.4	Anti-emballement du régulateur	149
4.6.5	Régulation PID par commande tout ou rien	150
4.6.6	Régulation de pH	152
4.7	Méthode de synthèse directe	158
4.8	Commande par modèle interne	158
4.9	Placement de pôles	164
4.9.1	Robustesse de la commande par placement de pôles	170
4.9.2	Régulateur à retour de sortie unitaire	172
4.10	Commande linéaire quadratique	172
4.10.1	Comportement en régulation	173
4.10.2	Comportement en poursuite	173

5	Analyse fréquentielle	181
5.1	Réponse d'un système linéaire à une entrée sinusoïdale	181
5.1.1	Cas d'un procédé de premier ordre	181
5.1.2	Note sur les nombres complexes	183
5.1.3	Cas d'un procédé linéaire quelconque	184
5.1.4	Cas de systèmes linéaires en série	185
5.2	Représentation graphique	185
5.2.1	Diagramme de Bode	185
5.2.2	Système d'ordre n	187
5.2.3	Diagramme de Nyquist	189
5.2.4	Système d'ordre n	191
5.2.5	Diagramme de Black	192
5.3	Caractérisation d'un système par analyse fréquentielle	192
5.4	Réponse fréquentielle des régulateurs à rétroaction	193
5.4.1	Régulateur proportionnel	193
5.4.2	Régulateur proportionnel-intégral	193
5.4.3	Régulateur proportionnel-dérivé idéal	194
5.4.4	Régulateur proportionnel-intégral-dérivé	196
5.5	Critère de stabilité de Bode	198
5.6	Marge de gain et marge de phase	203
5.6.1	Marge de gain	203
5.6.2	Marge de phase	204
5.7	Critère de stabilité de Nyquist	208
5.8	Réponse fréquentielle en boucle fermée	211
5.9	Principe de modèle interne	217
5.10	Robustesse	217
5.11	Résumé pour la conception	232
6	Amélioration des systèmes de commande	235
6.1	Compensation du retard pur	235
6.2	Compensation du phénomène de réponse inverse	237
6.3	Commande en cascade	239
6.4	Commande sélective	245
6.5	Commande partagée	246
6.6	Commande par anticipation ("feedforward")	246
6.6.1	Généralités	246
6.6.2	Application en distillation	247
6.6.3	Synthèse d'un régulateur par anticipation	248
6.6.4	Réalisation d'un régulateur par anticipation	250
6.6.5	Commande par anticipation et rétroaction	252
6.7	Commande par rapport	253
7	Représentation d'état, commandabilité, observabilité	257
7.1	Représentation d'état	257
7.1.1	Système monovariante	257
7.1.2	Système multivariante	258
7.2	Commandabilité	259
7.3	Observabilité	263
7.4	Réalisations	266
7.5	Remarque sur la commandabilité et l'observabilité en discret	271

8 Commande multivariable par matrice de fonctions de transfert 275

- 8.1 Représentation d'un procédé multivariable par matrice de fonctions de transfert 275
- 8.2 Etude de stabilité 277
 - 8.2.1 Forme de Smith-McMillan 278
 - 8.2.2 Pôles et zéros d'une matrice de fonctions de transfert 278
 - 8.2.3 Critère de Nyquist généralisé 278
 - 8.2.4 Lieux caractéristiques 279
 - 8.2.5 Cercles de Gershgorin 280
 - 8.2.6 Indice de Niederlinski 281
- 8.3 Interaction et découplage 281
 - 8.3.1 Découplage pour un système 2×2 282
 - 8.3.2 Rejet de perturbations 283
 - 8.3.3 Décomposition en valeurs singulières 283
 - 8.3.4 Matrice de gain relatif 284
 - 8.3.5 Cercles de Gershgorin et interaction 290
- 8.4 Robustesse multivariable 290
- 8.5 Etude de robustesse d'une colonne de distillation 2×2 294
 - 8.5.1 Analyse du découplage simplifié 294
 - 8.5.2 Analyse du découplage idéal 295
 - 8.5.3 Analyse du découplage unilatéral 296
 - 8.5.4 Comparaison des trois découplages précédents 296
- 8.6 Synthèse d'une commande multivariable 296
 - 8.6.1 Réglage des correcteurs 297
- 8.7 Commande multivariable discrète par modèle interne 298

III Identification en temps discret

9 Généralités sur les signaux 305

- 9.1 Transformation de Fourier et traitement du signal 305
 - 9.1.1 Transformée de Fourier continue 306
 - 9.1.2 Transformée de Fourier discrète 311
 - 9.1.3 Signaux aléatoires 315
 - 9.1.4 Signaux aléatoires stationnaires 316
 - 9.1.5 Résumé 317
- 9.2 Echantillonnage 318
 - 9.2.1 Conversions AN et NA 318
 - 9.2.2 Choix de la période d'échantillonnage 319
- 9.3 Filtrage 325
 - 9.3.1 Filtre de premier ordre 326
 - 9.3.2 Filtre de deuxième ordre 327
 - 9.3.3 Filtre à moyenne mobile 327
 - 9.3.4 Filtre ébarbeur 328
- 9.4 Temps discret et modèles de différences finies 329
- 9.5 Différentes représentations discrètes d'un système 330
 - 9.5.1 Représentation discrète: Transformation en z 330
 - 9.5.2 Conversion d'une description continue en temps discret 349

10 Principes de l'identification	359
10.1 Description du système	359
10.1.1 Système sans perturbation	359
10.1.2 Représentation d'une perturbation	360
10.2 Identification non paramétrique	361
10.2.1 Identification fréquentielle	361
10.2.2 Identification par analyse de corrélation	362
10.2.3 Identification spectrale	363
10.3 Identification paramétrique	367
10.3.1 Principes de prédiction	367
10.3.2 Prédiction à un pas	367
10.3.3 Prédiction à p pas	372
11 Modèles et méthodes pour l'identification paramétrique	375
11.1 Structure des modèles pour l'identification paramétrique	375
11.1.1 Modèles linéaires de fonctions de transfert	375
11.1.2 Modèles pour l'estimation dans l'espace d'état	385
11.2 Modèles de systèmes linéaires dépendant du temps	393
11.3 Linéarisation de modèles non linéaires dépendant du temps	393
11.4 Principes de l'estimation paramétrique	394
11.4.1 Minimisation des erreurs de prédiction	394
11.4.2 Régressions linéaires et moindres carrés	395
11.4.3 Méthode du maximum de vraisemblance	398
11.4.4 Corrélation des erreurs de prédiction avec les données passées	401
11.4.5 Méthode de la variable instrumentale	402
12 Algorithmes d'estimation paramétrique	407
12.1 Régression linéaire et moindres carrés	407
12.2 Méthodes de gradient	409
12.2.1 Méthode de gradient basée sur l'erreur a priori	409
12.2.2 Méthode de gradient basée sur l'erreur a posteriori	413
12.3 Algorithmes récursifs	415
12.3.1 Moindres Carrés Récursifs Simples	415
12.3.2 Moindres Carrés Récursifs Etendus	423
12.3.3 Moindres Carrés Récursifs Généralisés	423
12.3.4 Maximum de Vraisemblance Récursif	424
12.3.5 Méthode d'Erreur de Prédiction Récursive	425
12.3.6 Méthode de la Variable Instrumentale	428
12.3.7 Méthode d'erreur de sortie	428
12.4 Robustification des algorithmes	429
12.5 Validation	431
12.6 Suites d'entrée pour l'identification	432
12.6.1 Suite binaire pseudo aléatoire	432
12.6.2 Autres suites pour l'identification	434
12.7 Exemples d'identification	440
12.7.1 Exemple académique d'un système de second ordre	440
12.7.2 Identification d'un réacteur chimique simulé	445

13	Commande numérique	453
13.1	Commande par placement de pôles	453
13.1.1	Influence de la position des pôles	453
13.1.2	Synthèse de la commande par placement des pôles	453
13.1.3	Relation entre le placement de pôles et le retour d'état	460
13.1.4	Synthèse générale du placement de pôles	463
13.1.5	Régulateur PID numérique	470
13.2	Commande par modèle interne discrète	472
13.3	Généralités sur la commande adaptative	479
14	Commande optimale	483
14.1	Introduction	483
14.2	Position du problème	484
14.3	Méthode variationnelle classique dans le cadre mathématique	486
14.3.1	Variation du critère	487
14.3.2	Problème variationnel sans contraintes, à limites fixes	488
14.3.3	Problème variationnel avec contraintes, cas général	489
14.3.4	Equation de Hamilton-Jacobi	491
14.4	Commande optimale	493
14.4.1	Méthodes variationnelles	493
14.4.2	Variation du critère	494
14.4.3	Equations d'Euler	496
14.4.4	Condition de Weierstrass et maximisation du hamiltonien	498
14.4.5	Equation de Hamilton-Jacobi	498
14.4.6	Principe du maximum	501
14.4.7	Arcs singuliers	503
14.4.8	Problèmes numériques	510
14.5	Programmation dynamique	515
14.5.1	Programmation dynamique classique	515
14.5.2	Equation de Hamilton-Jacobi-Bellman	520
14.6	Commande linéaire quadratique	521
14.6.1	Commande linéaire quadratique en temps continu	521
14.6.2	Commande linéaire quadratique gaussienne	528
14.6.3	Commande linéaire quadratique en temps discret	535
15	Commande prédictive	547
15.1	Intérêt de la commande prédictive généralisée	547
15.2	Bref aperçu de l'évolution de la commande prédictive	548
15.3	Commande prédictive généralisée simple	549
15.3.1	Présentation théorique	549
15.3.2	<i>Exemple</i> numérique: Commande prédictive généralisée d'un réacteur chimique	552
15.3.3	La CPG vue comme un placement de pôles	554
15.4	Commande prédictive généralisée avec modèle de référence multiple	555
15.4.1	Présentation théorique	555
15.4.2	<i>Exemple</i> numérique: Commande prédictive généralisée avec modèle de performance d'un réacteur chimique	558
15.5	Commande avec modèle de référence sur l'état partiel	559

15.6	Commande prédictive généralisée d'un réacteur chimique	560
16	Commande prédictive basée sur le modèle	567
16.1	Une vue générale de la commande prédictive basée sur le modèle	567
16.2	Commande prédictive linéaire basée sur le modèle	573
16.2.1	En absence de contraintes	573
16.2.2	En présence de contraintes	573
16.2.3	Brève description de IDCOM	573
16.2.4	Commande dynamique matricielle (Dynamic Matrix Control DMC)	574
16.2.5	Commande matricielle dynamique quadratique: Quadratic Dynamic Matrix Control (QDMC)	580
16.2.6	Formulation dans l'espace d'état de DMC	585
16.2.7	Commande prédictive linéaire dans l'espace d'état: OBMPC	587
16.2.8	Commande prédictive linéaire basée sur le modèle en tant qu'optimisation générale	590
16.3	Commande prédictive non linéaire	591
16.3.1	Commande dynamique matricielle non linéaire: Nonlinear Quadratic Dynamic Matrix Control (NLQDMC)	591
16.3.2	Autres approches de la commande prédictive non linéaire	593
16.4	Commande prédictive basée sur le modèle d'un FCC	596
16.4.1	Modélisation du FCC	596
V	Commande non linéaire	611
17	Commande géométrique non linéaire	613
17.1	Quelques notions de linéaire utiles en non linéaire	614
17.1.1	Influence d'un changement de coordonnées en linéaire	614
17.1.2	Degré relatif	615
17.1.3	Forme normale et degré relatif	616
17.1.4	Dynamique des zéros	618
17.1.5	Retour d'état statique	618
17.1.6	Placement de pôles par retour d'état statique	619
17.1.7	Placement de pôles entrée-sortie	621
17.2	Commande non linéaire monovariante	621
17.2.1	Quelques notions de géométrie différentielle	621
17.2.2	Degré relatif d'un système non linéaire monovariante	623
17.2.3	Théorème de Frobenius	624
17.2.4	Changement de coordonnées	625
17.2.5	Forme normale	626
17.2.6	Commandabilité et observabilité	627
17.2.7	Principe de la linéarisation par bouclage	628
17.2.8	Linéarisation exacte entrée-états pour un système de degré relatif égal à n	629
17.2.9	Linéarisation entrée-sortie d'un système de degré relatif r inférieur ou égal à n	631
17.2.10	Dynamique des zéros	632

17.2.11	Stabilité asymptotique	634
17.2.12	Poursuite d'une trajectoire de référence	636
17.2.13	Découplage par rapport à une perturbation	637
17.2.14	Cas de systèmes à non-minimum de phase	638
17.2.15	Commande globalement linéarisante	638
17.3	Commande non linéaire multivariable	639
17.3.1	Degré relatif	640
17.3.2	Changement de coordonnées	641
17.3.3	Forme normale	641
17.3.4	Dynamique des zéros	642
17.3.5	Linéarisation exacte par retour d'état et difféomorphisme	642
17.3.6	Commande non linéaire parfaitement découplée par retour d'état statique	643
17.3.7	Obtention d'un degré relatif par extension dynamique	644
17.3.8	Commande adaptative non linéaire	645
17.4	Applications de commande non linéaire géométrique	646
18	Observateurs d'état	651
18.1	Introduction	651
18.1.1	Capteurs indirects	652
18.1.2	Principe d'un observateur	652
18.2	Estimation paramétrique	653
18.3	Estimation statistique	653
18.3.1	A propos des données	654
18.3.2	Analyse en Composantes Principales	654
18.3.3	Moindres Carrés Partiels (Partial Least Squares)	656
18.4	Observateurs	658
18.4.1	Observateur de Luenberger	658
18.4.2	Filtre de Kalman linéaire	661
18.4.3	Filtre de Kalman étendu (EKF) sous forme continue-discrète	663
18.4.4	Filtre de Kalman inodore	665
18.4.5	Filtres à particules	668
18.4.6	Filtre d'ensemble de Kalman	673
18.4.7	Observateur globalement linéarisant	675
18.4.8	Observateur à grand gain	676
18.4.9	Estimation à horizon glissant	679
18.5	Conclusion	683

VI Applications aux procédés 691

19	Commande non linéaire de réacteurs avec estimation d'état	693
19.1	Introduction	693
19.2	Réacteur chimique	693
19.2.1	Modèle du réacteur chimique	694
19.2.2	Position du problème de commande	695
19.2.3	Obtention de la loi de commande	697
19.2.4	Estimations des états	698
19.2.5	Résultats de simulation	700

19.3 Réacteur biologique	704
19.3.1 Introduction	704
19.3.2 Modèle dynamique du réacteur biologique	705
19.3.3 Synthèse de la loi de commande non linéaire	706
19.3.4 Conditions de simulation	709
19.3.5 Résultats de simulation	710
19.3.6 Conclusion	710
20 Commande de colonnes de distillation	715
20.1 Généralités sur le fonctionnement des colonnes de distillation	715
20.2 Modèle dynamique de la colonne de distillation	718
20.3 Généralités sur la conduite des colonnes de distillation	722
20.4 Différents types de commande des colonnes de distillation	723
20.4.1 Commande monovariable	723
20.4.2 Commande duale par découplage	724
20.4.3 La colonne vue comme un système 5×5	728
20.4.4 Commande numérique linéaire	732
20.4.5 Commande prédictive basée sur le modèle	734
20.4.6 Modèles bilinéaires	734
20.4.7 Commande non linéaire	737
20.5 Conclusion	740
21 Exemples et problème-tests de procédés typiques	745
21.1 Procédés simple entrée-simple sortie	745
21.1.1 Description par fonctions de transfert	745
21.1.2 Description par un modèle de connaissance	746
21.1.3 Description par un modèle linéaire dans l'espace d'état	751
21.2 Procédés multivariables	752
21.2.1 Matrices de fonctions de transfert continues	752
21.2.2 Description par un modèle linéaire dans l'espace d'état	754
21.2.3 Description par un modèle de connaissance dans l'espace d'état	755
21.2.4 Modèles continus dans l'espace d'état	756