

Jacques Richalet, Guy Lavielle, Joëlle Mallet

Sous la direction de Gérard Dreyfus

La commande prédictive

Mise en œuvre
et applications industrielles

ECT 60/2

31610/e

(2)

La commande prédictive

Jacques Richalet, Guy Lavielle, Joëlle Mallet

Sous la direction de Gérard Dreyfus



●
EYROLLES

Table des matières

Guide de lecture	1
Catégorie 1	1
Catégorie 2	1
Catégorie 3	1
Catégorie 4	2
Notations utilisées	3
Caractères latins	3
Caractères grecs	4
 CHAPITRE 1	
Pourquoi la commande prédictive?	5
1.1 Rupture avec la commande PID	6
1.2 Impact industriel	8
Le pétrole	8
La défense	9
1.3 Objectif	9
Schéma-bloc de commande prédictive	11

CHAPITRE 2

Modèle interne	13
2.1 Nécessité de la prédiction	13
2.2 Types de modèles	14
2.2.1 Modèle réaligné	15
2.2.2 Modèle indépendant	15
2.3 Décomposition (systèmes instables ou non asymptotiquement stables)	17
2.3.1 Prise en tendance	17
2.3.2 Décomposition	18
2.4 Prédiction	20
2.5 Simulation	22

CHAPITRE 3

Trajectoire de référence	23
3.1 Introduction	23
3.2 Trajectoire de référence	24
3.3 Cas d'un processus présentant un retard pur	26

CHAPITRE 4

Calcul de la commande	31
4.1 Calcul élémentaire	31
4.2 Absence d'intégrateur ?	33
4.3 Fonctions de base	34
4.3.1 Variable manipulée juste nécessaire ?	35
4.3.2 Capacité de calcul	37
4.3.3 Consigne polynomiale	37
4.4 Extension	39
4.5 Calcul du régulateur implicite	39
4.6 Commande d'un processus intégrateur	41
4.7 Prise en tendance	44
4.7.1 Processus sans retard	44
4.7.2 Processus avec retard	46

4.8 Extension : adoucisseur de MV	49
4.9 Représentation de convolution	50
4.10 Extension à des modèles d'ordre élevé	53
4.10.1 Pôles réels	53
4.10.2 Pôles complexes	54
4.10.3 Commande d'un oscillateur pur	57
4.10.4 Commande d'un processus d'ordre 1 stable avec zéro stable ou instable	60
4.11 Initialisation du régulateur	62
CHAPITRE 5	
Réglages	65
5.1 Rappels. Objectifs d'un régulateur	65
5.2 Précision	66
5.3 Dynamique	67
5.3.1 Réponse temporelle	67
5.3.2 Réponse fréquentielle	69
5.4 Robustesse	72
5.5 Choix des paramètres de réglage	75
5.5.1 Précision	75
5.5.2 Dynamique	75
5.5.3 Robustesse	75
5.6 Marge de gain en fonction du temps de réponse en boucle fermée	79
5.7 Règles pratiques	80
CHAPITRE 6	
Contraintes	81
6.1 Intérêt	81
6.2 Contraintes sur la variable manipulée	83
Incidence des contraintes sur le réglage du temps de réponse en boucle fermée	85
6.3 Contraintes sur une variable interne	85

CHAPITRE 7

Autocompensateur. Commande duale	89
7.1 Position du problème	89
7.2 Autocompensateur polynomial	91
7.3 Commande duale	92
7.3.1 Filtrage passe-bande	93
7.3.2 Extraction du signal harmonique par identification en temps réel	94
7.3.3 Régulateur complexe	99
7.3.4 Fonction de sensibilité	101
7.3.5 Commande duale harmonique	103
7.3.6 Commande duale. Élimination de perturbation	106
7.4 Conclusion	109

CHAPITRE 8

Implantation industrielle	111
8.1 Mise en œuvre	111
8.2 Commande de zone	112
8.3 Commande cascade	115
Transfert de contrainte	116
8.4 Commande modale série	118
8.5 Commande transparente	122
8.6 Commande partagée multi-MV	125
8.6.1 Actionneurs concomitants	125
8.6.2 Actionneurs alternés (split range)	129
8.7 Commande 1MV/2CV	131
8.8 Estimateur	133
8.9 Commandes non linéaires	135
8.9.1 Non linéarités sur la MV ou sur la CV	135
8.9.2 Retour non linéaire statique	137
8.10 Méthode de scénario	139

8.11 Commande 2CV/2MV	140
8.11.1 Cadre de l'étude	140
8.11.2 Calcul de la commande	141
8.11.3 Contraintes sur les MV	142
8.11.4 Réglage	146
CHAPITRE 9	
Commande paramétrique	147
9.1 Instabilité paramétrique	147
9.2 Échange thermique	148
9.3 Transfert de contrainte	153
9.4 Évaluation	154
CHAPITRE 10	
Pôles et zéros instables	157
10.1 Difficulté	157
10.2 Zéro et pôle stables	159
10.3 Commande d'un processus avec zéro instable et pôle stable ...	161
10.4 Commande du processus $H(p) = \frac{1 + 50p}{1 - 100p}$	162
10.5 Commande du processus $H(p) = \frac{1 + T1p}{1 + T2p}$	163
10.5.1 Cas $T2 < T1 < 0$	163
10.5.2 Cas $T1 < T2 < 0$	169
CHAPITRE 11	
Exemples industriels	171
11.1 Applications industrielles	171
11.2 Échange thermique	172
11.2.1. Position du problème	172
11.2.2 Théorème de convexité	173
11.2.3 Échange fluide/masse	175
11.2.4 Échangeur à contre-courant	183
11.2.5 Implantation d'une commande à base de modèle de connaissance	184

11.3 Échangeur IRA	185
11.3.1 Modèle de l'échangeur	185
11.3.2 Commande	187
11.3.3 Résultats	190
11.4 ARCELOR	195
11.4.1 Coulées Continues	195
11.4.2 Agglomération sur grille	203
11.4.3 Générateurs de vapeur GV1/2	208
CHAPITRE	
Conclusion	225
Caractéristiques de la commande PFC	226
Modèle	226
Trajectoire de référence	226
Solveur	226
Fonctions de base	227
Domaines temporel et fréquentiel	227
Limites de la commande PFC	227
Monovariable	227
Contraintes	227
Effort	227
Risque	228
Annexes	231
Annexe 1	231
Commandes élémentaires de processus	231
Annexe 2	239
2.1 Calcul du coefficient d'échange thermique U	239
2.2 Calcul de la constante de temps tau	240
Références	240
Annexe 3	241
Échangeur à contre-courant. Modèle statique	241
Annexe 4	247
Modélisation du caloporteur	247

Aide-mémoire	249
Chapitre 2 : Modélisation	249
Chapitre 3 : Trajectoire de référence	250
Chapitre 4 : Calcul de la commande	250
Chapitre 5 : Réglages	252
Chapitre 6 : Transfert de contraintes	252
Chapitre 7 : Autocompensateur	252
Chapitre 8 : Implantation industrielle	253
Chapitre 9 : Commande paramétrique PPC	253
Chapitre 11 : Échangeur thermique	254
Bibliographie	255
Index	257

La commande prédictive

Ingénieur ENSAE (Sup Aéro), Master of Sciences de l'Université de Berkeley et docteur ès Sciences, Jacques Richalet est fondateur et ancien directeur d'Adersa, société de services en automatique, spécialisée en modélisation, simulation et commande de processus, qui fut à l'origine de la commande prédictive au début des années 1970. Il est actuellement consultant, enseignant, et formateur en automatique continue.

Ingénieur ENSEEIHT (section spéciale), Guy Lavielle est ingénieur Process-Métrologie à Sollac Méditerranée (groupe ARCELOR) et travaille depuis plus de 15 ans à la mise en application de la commande avancée dans des procédés industriels : régulation prédictive, commande par logique floue, réseaux de neurones, modélisation dynamique...

Docteur ingénieur en chimie, spécialisée en informatique industrielle, Joëlle Mallet est chargée du développement de l'automatique avancée à l'IRA (Institut de Régulation et d'Automation) à Arles. Elle dispense des formations continues dans ce domaine et participe à la mise en œuvre de techniques d'automatique avancée à l'usage d'industriels.

- ▶ De toutes les commandes dites « avancées », la commande prédictive est la plus utilisée dans l'industrie, aussi bien pour les qualités techniques auxquelles elle doit ses performances que pour sa facilité de mise en œuvre. Son champ d'application s'étend à tous les domaines industriels, notamment aux cas où la régulation PID n'est pas efficace.
- ▶ Cet ouvrage a un objectif essentiellement pratique : aider les ingénieurs et techniciens à mettre en œuvre la commande prédictive. Ni traité d'automatique, ni manuel académique, il présente au lecteur un parcours de difficulté croissante où sont exposées des situations fréquentes dans le contexte industriel : systèmes instables, prise en compte de contraintes, systèmes à réponse inverse, etc. Les équations de régulation les plus courantes sont bien sûr fournies en fin d'ouvrage.
- ▶ **À qui s'adresse ce livre ?**
 - Aux techniciens recherchant une formation élémentaire à la commande prédictive pour la mettre en œuvre sur des processus de production industriels.
 - Aux responsables techniques des entreprises souhaitant une évaluation objective de cette technique.
 - Aux étudiants de BTS et élèves ingénieurs qui doivent en assimiler de manière pratique les principes fondamentaux, et à leurs enseignants.
- ▶ **Au sommaire**

Commande prédictive et commande PID. Nécessité de la prédiction. **Types de modèles.** Modèle réaligné et modèle indépendant. Décomposition pour les systèmes instables. Prédiction. Simulation. Trajectoire de référence. Retard pur. Calcul de la commande. Processus intégrateur. Absence et présence de retard. Adoucisseur de commande. Représentation de convolution. Modèles d'ordre élevé. Initialisation du régulateur. **Réglages.** Objectifs d'un régulateur. Précision. Dynamique. Robustesse. Marge de gain. **Contraintes sur les variables.** **Mise en œuvre industrielle.** Commande paramétrique. Transfert de contrainte. Évaluation. **Pôles et zéros instables.** **Applications industrielles.** Échange thermique. Théorème de convexité. Échangeur à contre-courant. Implantation d'une commande à base de modèle de connaissance. Échangeur IRA. ARCELOR. Couléennes continues. Agglomération sur grille. Générateurs de vapeur. Équations de régulation courantes.

Code éditeur : G11553 • ISBN : 2-212-11553-9



30 €

EYROLLES