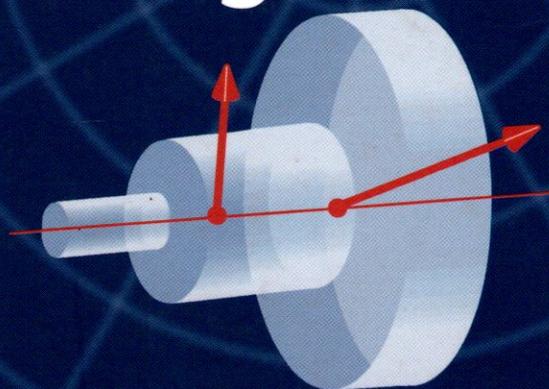


Hatto Schneider

Technique d'équilibrage



 Springer

Sommaire

	Avant-propos	V
	Préface à la 6^e édition allemande	VII
1	Introduction	1
1.1	Développement de la technique d'équilibrage	2
1.2	Normes et directives	8
2	Principes physiques	9
2.1	Grandeurs physiques	9
2.2	Scalars et vecteurs	9
2.2.1	Addition	10
2.2.2	Multiplication	10
2.3	Système d'unités	12
2.3.1	Grandeurs fondamentales	12
2.3.2	Grandeurs dérivées	12
2.4	Lois physiques	13
2.4.1	Équation fondamentale de la dynamique	13
2.4.2	Gravitation	14
2.5	Rotation	14
2.5.1	Angle plan	15
2.5.2	Vitesse angulaire	16
2.5.3	Vitesse tangentielle	16
2.5.4	Accélération angulaire	17
2.5.5	Accélération tangentielle	17
2.5.6	Couple d'entraînement	17
2.5.7	Moment d'inertie	18
2.5.8	Accélération radiale	18
2.5.9	Force centrifuge	19
2.6	Oscillations	20
2.6.1	Oscillateur simple sous l'action de la force centrifuge	20
2.6.1.1	Domaine sous-critique	23
2.6.1.2	Domaine de résonance	24
2.6.1.3	Domaine surcritique	24
2.6.2	Degrés de liberté	25

2.6.3	Raideur dynamique	25
3	Théorie du rotor rigide	27
3.1	Définitions et explications	28
3.2	Balourd d'un rotor en forme de disque	30
3.3	Balourd d'un rotor (cas général)	31
3.4	Balourd statique	33
3.5	Moment de balourd	36
3.6	Balourd quasi statique	37
3.7	Balourd dynamique	39
3.8	Représentation d'un balourd	40
3.8.1	Dernière approche	44
4	Théorie du rotor flexible	47
4.1	Rotor plastique	48
4.2	Rotor à corps élastique	48
4.3	Rotor à arbre élastique	50
4.3.1	Rotor à arbre élastique idéal	51
4.3.2	Influence de la rigidité des paliers	52
4.3.3	Fréquence à l'arrêt et vitesse critique	54
4.3.4	Rotor à arbre élastique (cas général)	55
4.3.5	Action des balourds sur les rotors à arbre élastique	55
4.3.5.1	Balourds modaux	56
4.3.5.2	Balourd modal équivalent	56
4.3.6	Correction d'un rotor à arbre élastique	57
4.3.6.1	Premier mode de flexion	58
4.3.6.2	Deuxième mode de flexion	59
4.3.6.3	Troisième mode de flexion	60
5	Tolérances et évaluation du rotor rigide	61
5.1	Critères d'évaluation	61
5.1.1	Masse du rotor et balourd résiduel admissible	61
5.1.2	Vitesse de service et balourd résiduel admissible	62
5.2	Détermination du balourd résiduel admissible	62
5.2.1	Classes de qualité et groupes de rotors	63
5.2.2	Détermination expérimentale	65
5.2.3	Détermination à partir des forces admissibles aux paliers	66
5.3	Répartition sur les plans de correction	66
5.3.1	Rotors avec un plan de correction	67
5.3.2	Rotor avec deux plans de correction	68
5.4	Calcul du balourd résiduel	73
5.5	Calcul de la qualité d'équilibrage atteinte	75
5.6	Contrôle du balourd	76
6	Tolérances et évaluation du rotor flexible	77
6.1	Tolérances de balourd selon DIN ISO 1142	77

6.2	Proposition de l'auteur	78
6.2.1	Représentation du balourd d'un rotor	78
6.2.2	Limites de tolérance	79
6.2.3	Distribution sur plusieurs balourds	80
6.2.4	Différents déséquilibres	81
6.2.4.1	Rotor équilibré	81
6.2.4.2	Équilibrage en un plan	81
6.2.4.3	Équilibrage en deux plans	82
6.2.4.4	Équilibrage en plusieurs plans	83
6.2.5	Proposition	84
6.2.6	Vitesse nominale	85
6.3	Évaluation d'un balourd	85
6.3.1	Machine à équilibrer basse vitesse	86
6.3.2	Machine ou installation à équilibrer haute vitesse	86
6.3.2.1	Vibrations admissibles	86
6.3.2.2	Balourds admissibles	87
6.3.3	Au banc d'essai	87
6.3.4	Sur site	87
6.4	Vulnérabilité et sensibilité au déséquilibre des machines	88
6.4.1	Classification des vulnérabilités des machines	88
6.4.2	Domaines des sensibilités modales	89
6.4.3	Courbes enveloppes	90
6.4.4	Détermination expérimentale des sensibilités modales	93
7	Procédures d'équilibrage des rotors rigides	95
7.1	Corps sans arbre propre	95
7.1.1	Balourds provoqués par le montage de prise de pièce	95
7.1.2	Méthode d'équilibrage par retournement	99
7.1.3	Autres applications de la méthode	102
7.1.4	Faux-arbres, adaplateurs	102
7.2	Rotors assemblés	102
7.2.1	Interchangeabilité des pièces	103
7.2.2	Corrections des erreurs d'assemblage	104
7.2.3	Masses équivalentes (<i>dummies</i>)	104
7.3	Rotors avec clavettes	104
7.3.1	Arbre avec clavette entière	105
7.3.2	Arbre avec demi-clavette	105
7.3.3	Influence sur le balourd	106
7.3.4	Mémorisation de l'influence	106
7.3.5	Mesures de compensation à la fabrication	106
8	Procédures d'équilibrage des rotors flexibles	107
8.1	Catégories de rotors	107
8.1.1	Catégories de base des rotors à arbre élastique	107
8.1.2	Principes d'équilibrage	108
8.1.3	Rotor avec disques	109

8.1.3.1	Rotor à disque unique	109
8.1.3.2	Rotor à deux disques	110
8.1.3.3	Rotor à plus de deux disques	110
8.1.4	Rotor à tronçons rigides	111
8.1.5	Rotor cylindrique	112
8.1.6	Rotor intégral	112
8.1.7	Combinaisons	112
8.1.8	Cas de réparation	112
8.2	Procédures d'équilibrage	113
8.2.1	Procédure A : équilibrage en un plan	113
8.2.2	Procédure B : équilibrage en deux plans	113
8.2.3	Procédure C : équilibrage des différentes pièces avant le montage	114
8.2.4	Procédure D : équilibrage après limitation du balourd initial	114
8.2.5	Procédure E : équilibrage pas à pas pendant le montage	114
8.2.5.1	Problème des transferts de balourds	114
8.2.5.2	Solution	115
8.2.6	Procédure F : équilibrage dans des plans optimaux	116
8.2.7	Procédure G : équilibrage pour différentes vitesses	116
8.2.7.1	Développement en série	117
8.2.7.2	Comportement en réponse	118
8.2.7.3	Rapport de correction	118
8.2.7.4	Recommandation	119
8.2.7.5	Assistance du calculateur	120
8.2.8	Procédure H : équilibrage à la vitesse nominale	121
8.2.9	Procédure I : équilibrage à une vitesse donnée	121
8.2.10	Procédure pour un comportement plastique	122
9	Description de l'opération d'équilibrage	123
9.1	Rotor avec arbre propre	123
9.1.1	Description tabulaire du type de rotor	124
9.1.2	Autres tableaux	124
9.1.3	Données maximales	124
9.1.4	Informations supplémentaires sur les rotors	124
9.2	Rotor sans arbre propre	126
9.3	Rotor à haute vitesse	128
10	Machines à équilibrer	129
10.1	Offre et documentation technique	129
10.1.1	Machines à équilibrer horizontales	129
10.1.1.1	Limites pour la masse du rotor et le balourd	129
10.1.1.2	Efficacité du cycle de mesure	130
10.1.1.3	Rapport de réduction du balourd	130
10.1.1.4	Dimensions du rotor	130
10.1.1.5	Portées de palier	132
10.1.1.6	Domaine de réglage des plans de correction	132
10.1.1.7	Entraînement	132

10.1.1.8	Freinage	132
10.1.1.9	Données supplémentaires	133
10.1.2	Machines à équilibrer verticales	133
10.1.2.1	Limites pour la masse du rotor et le balourd	134
10.1.2.2	Dimensions du rotor	134
10.1.2.3	Influence du moment de balourd	135
10.1.3	Balances d'équilibrage statique	136
10.1.4	Machines à équilibrer haute vitesse	136
10.1.4.1	Entraînement	137
10.1.4.2	Supports de paliers	138
10.1.4.3	Dispositif de mesure	138
10.2	Détails techniques et leur évaluation	138
10.2.1	Entraînement	139
10.2.1.1	Moteur à rotor en court-circuit	139
10.2.1.2	Moteur à bagues collectrices	139
10.2.1.3	Moteur à courant continu	140
10.2.1.4	Puissance de l'entraînement	140
10.2.1.5	Entraînement par arbre de transmission à cardan	141
10.2.1.6	Entraînement par courroie	141
10.2.1.7	Entraînement par champ magnétique rotatif	143
10.2.1.8	Entraînement propre	144
10.2.1.9	Entraînement par air comprimé	144
10.2.2	Systèmes d'affichage	145
10.2.3	Capteurs	147
10.2.4	Frein	147
10.2.5	Vitesse	148
10.2.6	Étalonnage et réglage de l'instrumentation de mesure	148
10.2.6.1	Machines à équilibrer à paliers souples	149
10.2.6.2	Machines à équilibrer à paliers rigides	150
10.2.7	Fondations	151
10.2.8	Plus petit balourd résiduel réalisable <i>U_{ger}</i>	151
10.2.9	Paliers	151
10.2.9.1	Paliers à galets porteurs	151
10.2.9.2	Paliers prismatiques	152
10.2.9.3	Paliers lisses	152
10.2.9.4	Paliers broche	153
10.2.9.5	Paliers de service	154
10.2.9.6	Paliers spécifiques	154
10.2.10	Moment d'inertie, nombre de cycles	155
10.2.11	Traitement de la mesure	156
10.2.12	Rotors d'essai, masses d'essai	156
10.2.12.1	Rotors d'essai	157
10.2.12.2	Masses d'essai	157
10.2.13	Surcharge	158
10.2.14	Influences de l'environnement	158
10.2.15	Rapport de réduction du balourd <i>RRB</i>	158
10.2.16	Efficacité	158

10.3	Conditions à réunir	159
11	Contrôle des machines à équilibrer	161
11.1	Statistiques concernant les balourds	162
11.1.1	Dispersion circulaire des résultats	163
11.1.2	Dispersion annulaire des résultats	164
11.1.3	Caractéristiques de distributions normales uni- et bidimensionnelles	165
11.1.4	Spécificités supplémentaires.....	166
11.1.5	Contrôle systématique ou par échantillonnage	166
11.1.6	Valeurs caractéristiques.....	167
11.1.7	Rejets.....	167
11.2	Rotors d'essai	167
11.2.1	Rotors d'essai type A	169
11.2.2	Rotors d'essai type B	170
11.2.3	Rotors d'essai type C	172
11.2.4	Conditions d'essai	173
11.3	Essai du plus petit balourd résiduel réalisable U_{GER}	176
11.3.1	Conditions initiales	176
11.3.2	Correction.....	176
11.3.3	Tests avec masses d'essai.....	177
11.3.4	Interprétation du test U_{GER}	177
11.3.5	Test U_{GER} simplifié.....	179
11.4	Test du rapport de réduction du balourd RRB	179
11.4.1	Conditions initiales.....	179
11.4.2	Tests avec masses d'essai.....	180
11.4.3	Interprétation du test RRB	181
11.4.4	Test RRB simplifié.....	182
11.5	Test du taux d'interaction du moment de balourd ME	182
11.5.1	Interprétation du test ME	182
11.6	Test de la compensation par retourement	183
11.6.1	Conditions initiales.....	183
11.6.2	Tests avec masses d'essai.....	183
11.6.3	Interprétation du test de la compensation par retourement.....	184
12	Correction	185
12.1	Types de correction	185
12.1.1	Enlèvement de matière	186
12.1.2	Déplacement de matière	188
12.1.3	Ajout de matière	188
12.2	Temps de correction	189
12.3	Écarts de correction	190
12.3.1	Masses de correction	191
12.3.2	Plans de correction	191
12.3.3	Rayons de correction	191
12.3.3.1	Correction radiale	192

12.3.3.2	Correction en périphtérie	192
12.3.3.3	Correction par écartement de deux masses de correction	192
12.3.4	Angle des masses de correction	192
12.3.5	Écarts acceptables lors de la correction	193
12.4	Rapport de réduction du balourd	194
13	Préparation et réalisation de l'équilibrage	195
13.1	Causes des balourds	195
13.2	Effets des balourds	196
13.3	Directives de fabrication et indications sur les plans	196
13.4	Étude de la correction	197
13.5	Préparation de l'opération	198
13.6	Chargement et déchargement	204
13.7	Préparation du rotor	205
13.8	L'équilibrage dans le processus de fabrication	206
14	Défauts lors de l'équilibrage	207
14.1	Limitation de la qualité d'équilibrage par le rotor	207
14.2	Défauts	207
14.2.1	Types de défauts	207
14.2.1.1	Défauts systématiques	208
14.2.1.2	Défauts aléatoires	208
14.2.1.3	Défauts scalaires	209
14.2.2	Explications	209
14.2.2.1	Pièces mobiles	209
14.2.2.2	Liquides ou solides à l'intérieur de cavités	212
14.2.2.3	Influences thermiques et effets de la gravité	213
14.2.2.4	Écoulement de l'air	213
14.2.2.5	Magnétisme	214
14.2.2.6	Inclinaison de roulements à billes	214
14.2.2.7	Montage incomplet.....	215
14.2.2.8	Accouplement sur le rotor	215
14.2.2.9	Jeu d'ajustement	215
14.2.2.10	Glissement de pièces rapportées	215
14.2.2.11	Balourd de l'outillage	216
14.2.2.12	Balourd dans l'élément d'entraînement	216
14.2.2.13	Désalignement de l'outillage	216
14.2.2.14	Excentricité du palier d'équilibrage	216
14.2.2.15	Défauts systématiques et aléatoires de la chaîne de mesure	217
14.3	Estimation du défaut global	217
14.4	Critères de réception	217
15	Protection lors de l'équilibrage	219
15.1	Dangers générés par le rotor	219
15.2	Classes de protection	220
15.2.1	Exemples de classes de protection.....	221

15.2.2.1	Énergie sursarrique spécifique	224
15.2.2.2	Énergie absolue	224
15.2.2.3	Impact	224
15.2.2.4	Classe de protection C pour des machines à équilibrer universelles	225
15.2.3	Conception de la protection	226
15.2.4	Identification de la protection	226
15.3	Responsabilités	226
16	Équilibrage sur site	227
16.1	Valeurs limites de vibrations	227
16.2	Présentation du problème	228
16.3	Théorie de l'équilibrage sur site	229
16.3.1	Causes de balourd	229
16.3.2	Problématique	230
16.3.3	Méthode	230
16.3.3.1	Correction en un plan	230
16.3.3.2	Correction en deux plans	232
16.3.3.3	Correction en plusieurs plans	233
16.4	Pratique de l'équilibrage sur site	234
16.4.1	Moyens de mesure	234
16.4.2	Plans de mesure	235
16.4.3	Conditions à réunir	235

17 Annexe 237

17.1	Symboles	237
17.2	Termes et définitions	240
17.2.1	Mécanique	240
17.2.2	Systèmes de rotors	241
17.2.3	Déséquilibre, balourd	244
17.2.4	Équilibrage	247
17.2.5	Machines à équilibrer et équipement	250
17.2.6	Rotors flexibles	257
17.2.7	Corps-libres rigides en rotation	260
17.2.8	Outillages pour machine à équilibrer	260
17.3	Données de calculs	261
17.3.1	Multiplés et sous-multiplés décimaux	262
17.3.2	Coefficients de conversion des unités SI en unités pouces/livres	263
17.3.3	Nomogrammes, diagrammes	264
17.4	Normes	286
17.4.1	DIN ISO 1940-1 (2003) : Vibrations mécaniques – Exigences en matière de qualité dans l'équilibrage pour les rotors en état rigide (constant). Partie I (2005) : Spécifications et vérification des tolérances d'équilibrage	287
17.4.2	DIN ISO 11342 : Vibrations mécaniques – Procédures et critères pour l'équilibrage mécanique de rotors flexibles	325