

旋转机械的平衡

〔日〕 三輪修三 下村玄 著



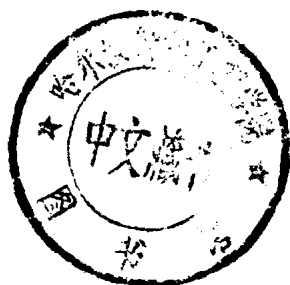
机械工业出版社

360222

旋转机械的平衡

〔日〕 三輪修三 下村玄 著

朱晓农 译 李钟岩 译校



机械工业出版社

(京)新登字054号

0281/01
内容简介

本书系统地介绍了旋转机械(包括刚性转子和挠性转子)、往复机械平衡的力学原理,平衡机的测量装置、机械结构及各种外围设备;平衡机的灵敏度和精度;各种通用平衡机和专用平衡机;刚性转子、挠性转子的平衡方法(包括环境平衡),以及振动和平衡方面的有关规范和标准等。

本书可供从事机械振动和平衡技术专业的工程技术人员、操作人员、研究设计人员及大专院校有关专业师生参考。

回転機械のつりあわせ

青山学院大学教授

三輪修三 著

工学博士

(株)明石製作所 下村玄

(株)コロナ社

1980年8月30日 三版发行

● ● ●
旋转机械的平衡

(日) 三輪修三 下村玄 著

朱晓农 译 李钟岩 译校

责任编辑:高金生 责任校对:葛志正

封面设计:肖靖 版式设计:冉晓华

责任印制:王国光

● ● ●
机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业登记证出字第117号)

机械工业出版社北京印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经销

● ● ●
开本 787×1092¹/₃₂ 印张9¹/₄ 字数201千字

1992年7月北京第1版·1992年7月北京第1次印刷

印数0 001—4 250·定价:8.50元

● ● ●
ISBN 7-111-03060-5/TH·332

译者的话

机械振动会产生噪声，加速轴承磨损，甚至严重影响产品的性能和使用寿命。为减小或消除机械振动，平衡技术已日益引起广泛重视，成为提高产品质量必不可少的重要手段。

本书是平衡技术领域一本颇有价值的参考书，其内容涉及该领域的各种问题，从平衡的力学原理到平衡机，从平衡方法到平衡标准等等都作了详细的介绍。

本书作者三輪修三和下村玄两位先生是日本颇有名望的平衡专家，三輪修三先生是日本青山学院大学教授、工学博士，下村玄先生是日本（株）明石制作所总工程师兼研究所所长，他们多年从事平衡技术的研究，积累了丰富的理论知识和实践经验。

本书初版发行于1976年，再版于1979年。本书虽然是根据1980年的第三版译成的，但其内容仍旧较新，亦不失去该书在90年代应有的参考价值。译者对原文排版中的一些明显错误，已作了更正，个别地方加了译注。相信本书的翻译出版能对我国从事旋转机械平衡工作的同行们有所帮助，对我国平衡技术的发展起到一点借鉴作用。

限于译者的水平，译文中难免出现不妥之处，恳请广大读者批评指正。

序 言

对机械运动部件，特别是旋转部件进行平衡是防止机械振动的一种行之有效的手段，这一点现已成为工程技术人员的一般常识。目前平衡技术领域中专业书籍为数不多，其中明石和彦、浅羽正三合著的《动平衡试验》一书，由コロナ社于1961年出版发行，它对普及平衡知识和技术起了很大作用。但该书出版至今已有十余年之久，在这一期间，技术的发展是十分显著的。由于技术革新提高了机械的性能以及社会对环境保护问题的重视，使平衡技术领域也出现了许多丰硕的成果，如机械高速旋转时产生动挠曲的挠性转子平衡问题的研究、硬支承平衡机和以微机应用为代表的新型测量系统的开发以及靠经验制定的各项标准、规范的颁发等等。

本书根据最近平衡技术的发展动向，介绍了目前旋转机械的平衡理论和实践问题。如果它能为各位读者有所帮助的话，本人将不胜欣慰。

本书主要是以大、中专毕业的中级技术人员作为读者对象。

本书的第一、二、六章由三轮修三执笔，第三、四、五章由下村玄执笔。笔者虽然在这一领域内的研究及技术方面积累了一些经验，但书中难免出现错误，恳请各位读者指正。

在本书出版之际，得到了《动平衡试验》一书的作者、明

石制作所董事社长明石和彦先生的指导和鼓励。另外有关出版方面的一切事务得到了コロナ社编辑部前田要人先生的大力帮助，在此一并表示衷心的感谢。

著 者

1976年7月

目 录

译者的话

序言

1. 总论	1
2. 机械平衡的力学	5
2.1 概要	5
2.2 刚性转子旋转机械的力学	6
2.2.1 惯性力及其平衡	6
2.2.2 不平衡	9
2.2.3 不平衡与转子的力学性质	18
2.2.4 由不平衡引起的支承力	23
2.2.5 不平衡与转子的振动	24
2.2.6 平衡条件	30
2.3 挠性转子旋转机械的力学	32
2.3.1 弯曲振动的固有函数	32
2.3.2 不平衡与轴的挠曲	37
2.3.3 由不平衡引起的支承力	45
2.3.4 平衡条件	49
2.3.5 转子、支承系统的性质与平衡条件	57
2.4 往复机械的力学	64
2.4.1 单缸往复机械的力学	64
2.4.2 多缸往复机械的力学	69
3. 平衡机	78
3.1 概要	78
3.2 校正平面分离	80

3.3 软支承与硬支承的力学分析	81
3.3.1 软支承与硬支承	81
3.3.2 校正平面分离	85
3.3.3 基础的研究	89
3.4 平衡机的测量装置	97
3.4.1 概要	97
3.4.2 硬支承动平衡机的测量方法	98
3.4.3 软支承动平衡机的测量方法	101
3.4.4 传感器	102
3.4.5 积分电路	107
3.4.6 校正平面分离电路	109
3.4.7 角度基准信号发生装置	113
3.4.8 乘法运算的方法	116
3.4.9 矢量合成与指示机构	120
3.4.10 其它测量方法	124
3.5 平衡机的机械结构	129
3.5.1 概要	129
3.5.2 轴承	129
3.5.3 支承架	137
3.5.4 驱动装置	144
3.6 平衡机的灵敏度与精度	152
3.7 各种通用平衡机	155
3.7.1 平衡机的种类	155
3.7.2 卧式通用平衡机	155
3.7.3 立式离心力式平衡机	159
3.7.4 重力式平衡机	162
3.8 平衡机的外围装置	167
3.8.1 概要	167
3.8.2 夹具与气动卡紧装置	168
3.8.3 偏心补偿装置	170

3.8.4	校正装置	172
3.8.5	角度位置自动停车装置	175
3.8.6	打标记装置	178
3.8.7	装卸装置	179
3.8.8	低速旋转装置	179
4.	平衡	181
4.1	不平衡的校正	181
4.1.1	平衡平面数目	181
4.1.2	极坐标校正与固定坐标(分量)校正	182
4.1.3	不平衡的校正方法	184
4.1.4	校正误差	187
4.2	从平衡观点谈转子设计	195
4.3	各种转子的平衡和专用平衡机	197
4.3.1	概要	197
4.3.2	传动轴的平衡	199
4.3.3	曲轴的平衡	206
4.3.4	往复质量的平衡	214
4.3.5	质量定心机	217
4.3.6	发动机总成的平衡	222
4.3.7	磨床砂轮的自动平衡	222
4.3.8	透平叶片的力矩平衡	226
4.4	平衡工艺与平衡自动线	228
4.4.1	平衡工艺	228
4.4.2	平衡自动线的总体构成	229
4.4.3	平衡自动线的控制	236
5.	现场平衡	240
5.1	概要	240
5.2	现场平衡仪	241
5.3	刚性转子的平衡	243
5.3.1	单面平衡	243

5.3.2 双面平衡	244
5.3.3 多面平衡	247
5.4 挠性转子的平衡	247
5.4.1 概要	247
5.4.2 影响系数法	251
5.4.3 利用最小二乘法的影响系数法	253
5.4.4 振型平衡法	255
5.4.5 振型圆法	261
5.4.6 振动分析装置	263
6. 有关标准	266
6.1 概要	266
6.2 刚性转子的平衡品质	267
6.3 通用平衡机, 性能的说明与评定	272
6.4 其它, 有关振动的标准	279
参考文献	284

1. 总 论

旋转机械的历史比古希腊还要早，甚至可以追溯到埃及

承起来的。运动中的旋转体所产生的离心力使轴承产生振动，振动波形由地震仪一类的装置记录下来。平衡操作所需的校正块的位置及大小根据这一记录确定，将校正块加到旋转体上，平衡操作即告完成。拉瓦切克-黑曼式平衡机的结构是原始的，操作也比较麻烦，但对高速旋转机械性能的提高做出了很大的贡献。就是在这种平衡机的基础上，各种各样的平衡机在世界各国相继制造出来了，如阿基莫夫(Akimoff)式(1916年)、索德伯格(Soderberg)式(1923年)以及直到最近仍在使用的崔伯勒(Trebel)平衡机等。

几乎在同一时期，日本由末広恭二、久野五十男制造出了一种独特的平衡机。1925年问世的末广式平衡机是平衡转速高于转子-支承系统共振频率的最早的平衡机，由于这一原因，使支承振动的测量精度以及平衡精度大大地提高了一步。久野式平衡机又对末广式平衡机作了更进一步的改进。1935年久野将同步发电机与光学放大装置结合起来应用于测量机构，通过在屏幕上显示出如李沙育图形那样的振动图像来读取支承振动的相位和大小，其测量方法简单而且精度高。由于这种平衡机的性能很好，所以制造出容量不同的各种机型，直到第二次世界大战后仍在日本国内广泛使用。久野于1936年进一步设计了采用交流发电机的瓦特计式测量装置，这种测量方法在外国也已研制出来，在德国和美国得到了迅速地发展。因此可以说，由于洛伊特林格(Reutlinger)的可动线圈式振动传感器的发明，以及在以德国的申克公司(Schenck)和美国的吉肖特公司(Gisholt)的瓦特计式为基础的电气测量机构发展的基础上，现代平衡机问世了。

日本的电测式平衡机于1950年开始正式制造，其后，随着测量、控制技术的飞跃进步，各种形式及大小型号的平衡

机陆续被制造出来。由于需要平衡的旋转机械涉及广泛的领域，因此相应的平衡机也有高精度型、高效率型、专用机、自动平衡机等，其规格及测量范围也很宽。例如，就平衡机平衡的对象而言，其质量范围可以从几克的手表摆轮到超过300t的原子能电站用透平转子，就其种类而言，有测量宇宙火箭及人造卫星惯性主轴的平衡机，也有以秒为单位在很短时间内、在无人操作的条件下，完成测量及校正全部平衡过程的平衡自动线等，专用平衡机的形式多种多样，不胜枚举。

平衡技术领域，目前的中心课题可以说是生产技术与标准化问题。前者可以归结为针对某一旋转体确定其合理的平衡精度以及为确保这一精度而建立平衡手段的问题，其中也包含平衡状态的好坏用什么尺度来进行判别、评价的基准问题。同时，高速旋转时产生动挠曲的挠性转子的平衡问题也极为重要，人们正在对这一问题进行种种研究和探索。另一个问题就是平衡的标准化问题，无论是国内还是国外，对于这一问题的讨论都十分活跃。JIS（日本工业标准）和ISO（国际标准）所制定的标准、基准的种类也在不断增加。这些标准无疑对产品操作的标准化、合理化做出贡献。

关于平衡技术今后的发展动向，普遍认为平衡的范围将扩展到旋转体制造的整个过程中去。现在，一谈起平衡，除了极少的例外，大都是针对旋转部件的最终工艺过程而言的。但是，在把整个制造工艺过程看作一个系统时，为了达到某一目的而力求用最少的劳动取得最大的效果，就必须研究并实施在工艺过程的某个阶段采用何种方式来进行平衡，也就是说，在旋转部件处于原材料准备、加工阶段、加工结束、装配阶段等各个不同阶段都必须要考虑平衡问题。这时，整

个工艺过程的监视、计算及控制当然要采用计算机。例如，对于成批生产的产品的平衡来说，需要对最终产品的统计性质进行在线监视，根据需要，反馈来的信息可使前面的工艺过程进行自动调整，以此来合理保持产品的平衡精度，这就是所谓的DDC (direct digital control) 系统，该系统是已经开发了的技术，它在平衡领域中的实际应用只是时间的问题。再进一步，平衡将不仅限于制造工艺中单纯的测量和校正操作，而是把机器运行时最终要控制的各种参数（例如蒸汽透平中的轴振动、磨床中被磨削工件的加工精度）直接反馈回来，使这些参数保持在期望的状态并对平衡状态进行自动调整，这就是适应控制 (adaptive control)，预计这一技术今后将趋于实用化。

2. 机械平衡的力学

2.1 概要

根据力学中的达朗伯原理，质量为 m 的物体以加速度 α （黑体字表示矢量）运动时，该物体在加速度的方向上产生 $-m\alpha$ 的力 \ominus ，这个力就是惯性力（也称为质量力），伴随旋转而产生的离心力就是惯性力。机械在运转中其运动部件所产生的惯性力及其力矩通过轴承或导轨作用到床身上，当惯性力的方向和大小随时间而改变时，它将给机械带来振动、噪声和部件疲劳破坏等恶劣影响。质量为 m 的部件在运动中必然附带有惯性力，如果这些惯性力在运动部件内部相互抵消而对外部不施加任何力的作用，则该部件处于平衡状态。调整处于不平衡状态下运动部件的质量分布，使之成为平衡状态的操作称为平衡。

在本章中将学习作为平衡基础的有关机械平衡方面的力学知识。在分析机械运动时，只考虑作用于系统的惯性力，不考虑燃料爆炸等外力或周围气流引起的力以及电磁力等等。另外，为简单起见，假定没有摩擦力。

\ominus 根据牛顿第二定律，使质量 m 获得加速度 α ，则需要作用 $F = m\alpha$ 的外力。当受外力 F 作用时必有一个 $-F$ 的力作用于外部，因此，具有加速度的质量 m 所产生的力（惯性力） $F' = -F = -m\alpha$ ，或者可写成 $F + F' = F + (-m\alpha) = 0$ ，这就是达朗伯原理。

2.2 刚性转子旋转机械的力学

在机械的旋转部件中,具有固定旋转轴的部件称为转子。在旋转的转子上,所有质量单元产生的惯性力都将使转子变形并使转轴挠曲,但如果转子是刚性的,则不会产生变形。尽管完全刚性的转子实际上并不存在,但在运转速度范围内,其变形能够忽略不计的转子则称之为刚性转子,而由于惯性力的影响,其弹性变形已不能忽视的转子称之为挠性转子。

2.2.1 惯性力及其平衡

假定有一刚性转子,它具有固定轴(Z轴)并允许转子绕该轴作旋转运动。如果取固定于转子上以角速度 ω 旋转的直角坐标系 $O-xyz$ (见图2.1),则转子上任意一点 Q 的位置矢量可写为

$$\begin{aligned} \mathbf{r} &= x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k} \\ &= \mathbf{r}' + z\mathbf{k} \end{aligned} \quad (2.1)$$

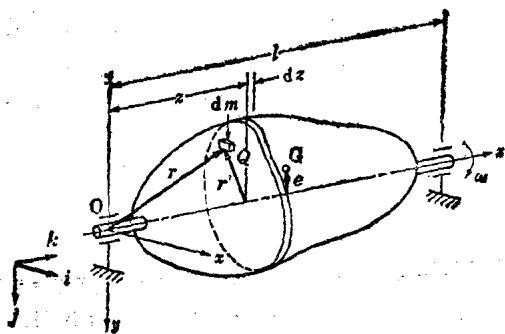


图2.1 刚性转子的质量分布

式中, x, y, z 是 r 的坐标分量, i, j, k 是各坐标轴方向上的单位矢量, $r' = xi + yj$ 则是 r 在垂直于 z 轴的面 (xy 面) 上投影后的分矢量。

为了求出 r 的速度 v 及加速度 a , 以时间 t 对公式 (2.1) 进行微分。因为转子是刚体, r 的坐标分量 x, y, z 对于时间是常数, 故有

$$v \equiv \dot{r} = x \frac{di}{dt} + y \frac{dj}{dt} + z \frac{dk}{dt}$$

角速度 ω 用矢量表示并写成 ω , 则由单位矢量的性质可以得出

$$\frac{di}{dt} = \omega \times i, \quad \frac{dj}{dt} = \omega \times j, \quad \frac{dk}{dt} = \omega \times k$$

式中, 符号 \times 表示矢量积。代入 v 的表达式后得出

$$v \equiv \dot{r} = \omega \times (xi + yj + zk) = \omega \times r$$

因为只考虑绕 z 轴的旋转运动, $\omega = \omega k$, $\omega \times k = \omega k \times k = 0$, 故有

$$v = \omega \times (xi + yj) = \omega \times r' (= r')$$

加速度 a 则可表示为从时间 t 对 v 的二次微分, 即

$$\begin{aligned} a \equiv \dot{v} &= \dot{\omega} \times r' + \omega \times \dot{r}' \\ &= \dot{\omega} k \times r' + \omega \times (\omega \times r') \\ &= \dot{\omega} k \times r' - \omega^2 r' \end{aligned} \quad (2.2)$$

公式右边第一项是决定于角加速度 $\dot{\omega}$ 的切线加速度, 第二项是决定于 ω 的沿半径方向的向心加速度。

在以加速度 a 运动的点 r 处有微小质量 dm , 则该质量产生的惯性力 dP 为

$$\begin{aligned} dP &= -a dm = -\dot{\omega} k \times r' dm + \omega^2 r' dm \\ &= \{(-\dot{\omega} k \times) + \omega^2\} r' dm \end{aligned}$$