

# 机械加工 振动分析

【日】星鐵太郎 著

师汉民 卢文祥 孙健利 译

华中理工大学出版社

78.15 TH161  
81 17

裝 册 容 内

机械加工振动分析

[日] 星 鐵太郎 著  
师汉民 卢文祥 孙健利 译

江苏工业学院图书馆  
藏书章

华中理工大学出版社

# 机械加工振动分析

〔日〕 星 鐵太郎 著

师汉民 卢文祥 孙健利 译

责任编辑 刘继宁

\*

华中理工大学出版社出版发行

(武昌 喻家山)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社沔阳印刷厂印刷

\*

开本:850×1168 1/32 印张:8.5 字数:195 000

1993年1月第1版 1993年1月第1次印刷

印数:1—1 500

ISBN 7-5609-0703-2/TH·62

定价:5.50元

(鄂)新登字第10号

848153

## 内 容 提 要

本书在适当介绍机械加工振动理论的基础上，着重分析了各种加工方法中出现的振动现象及抑制措施，此外还介绍了一些进行振动分析的实用方法。

全书分为三篇，共 12 章。其中，1~4 章为基础篇；5~8 章为对策篇；9~12 章为分析篇。

本书可供从事机床生产和使用的人员，或从事机械加工振动研究的人员参考；也可供机械类专业的师生学习。

## 译者序

日本丰桥技术科学大学生产系统工学系的星 鐵太郎教授在机床振动与机械加工方面的研究工作早已为我国学术界所熟知，他的前一本有关机床振动的专著《機械加工びびり現象——解析と対策》（日本工業調査会，1977；中译本《机械加工颤振的分析与对策》，上海科学技术出版社，1984）在我国流传甚广，对于促进该学科的发展以及中日学术交流，起到了积极作用。

此书是星教授继前书之后发表的另一本有关机床振动的专著。与前著相比较，此书的特点是，更为注重振动知识在机械加工振动的诊断与控制方面的实际应用，在概述了机械加工中各种类型的振动的特点与机理的基础上，侧重讲述对机械加工中的振动进行诊断与控制的各实用方法，介绍了大量的有效措施与丰富的实践经验。

此书的另一特点是，注重阐述磨削加工中振动的分析、诊断与控制方面的基础理论与实用知识，综合反映了作者本人及其他研究者近年来在磨削振动方面的主要研究成果。

我们认为此书对于从事机械加工的广大技术人员、高等学校有关专业的教师、研究生及高年级学生具有参考价值或指导意义。

当代机械加工技术正在向自动化与精密化方向发展，提出了大量有关振动的诊断与控制的实际问题与理论问题，这些问题刺激和促进了机床振动学科的进一步发展与推广应用。此书中译本的出版，对于提高我国机械加工生产的质量与效率，对于促进机床振动学科在我国的进一步发展，以及对于增进中日两国间的学术交流，均将起到积极作用。

此书作者星鐵太郎教授对于此书中译本的出版给予了热情的

支持与帮助。在此谨向星教授表示最衷心的感谢。

此书第一篇（第一至四章）由师汉民翻译，第二篇（第五至八章）由卢文祥翻译，第三篇（第九至十二章）由孙健利翻译，全书由师汉民审校与统稿。我们十分高兴地向我国工程技术界和学术界的朋友们推荐此书，并为能够承担此书的译写任务，从而能为此书在我国的传播与流行贡献绵薄之力而深感荣幸。

由于译者水平有限，更兼时间仓促，译文中不妥、甚至错误之处在所难免，切望读者不吝指教，给予批评指正。

译者 于华中理工大学

1991年7月23日

## 作者为中译本所写的序言

译者代表，华中理工大学师汉民教授，于1990年10月因两国交流计划来日访问，在丰桥技术科学大学进行了关于机械加工技术方面的学术交流。我对师汉民教授的广阔见识与卓异人品深表敬意。他对于机械加工中的振动问题持有深刻的见解，并且提出了抑制机床振动的新的理论与方法。在中国正在开展的有关其实装置的研究，相信正在萌生出一种颇有希望的技术。

师教授看到我于当年7月份刚刚出版的这本书，提出了出版中译本的建议，这对于我来说，实在是莫大的光荣。经征得日本原出版社吉本馨社长的同意，此书的中文版得以出版。在此谨向华中理工大学以师汉民教授为代表的全体翻译人员的努力表示谢意。

但愿此书的内容对于正在为提高车间的机械加工技术而努力的各方人士能有所裨益。

星 鐵太郎 于丰桥

1991年2月11日

## 原 序

对于前一部拙著《機械加工びびり現象——解析と対策》(日本工業調査会, 1977), 我曾听到许多意见, 其中之一是批评道: “虽然讲清了道理, 但并未指出合适的对策。”

此即是说, 即使对于切削过程中所伴随的振动进行了研究与解释, 也并不等于就已得到了迅速、正确地解决振动问题的技术。此外, 作为一种重要的机械加工方法的磨削, 在当时的情况是, 对其振动的解释尚无头绪。

其后的研究方向是从整理切削振动的实用诊断程序着手的。自从1979年转到丰桥技术科学大学任职以来, 通过“机械加工的振动分析”这一为时两天的课程, 为普及这方面的知识进行了努力。此项普及事业至1988年3月结束, 一共讲授了20次, 听讲者约300人, 主要是产业界的技术骨干。

另一方面, 在磨削振动中多年来一直未能弄清楚的许多现象也逐渐找到了解释的线索, 并开始整理若干实用的知识与方法。

今天, 机械加工的振动分析不仅对于机床的制造厂家, 而且对于其用户的生产现场来说, 都已成为生产技术中一项有用的手段。以下将举实例说明, 该手段将在何种情况下发挥作用。

## 振动分析的实用范围

### 1. 用于机床制造厂家

#### (a) 故障检测与排除

在出厂前的加工试验中, 当出现振动问题时, 或者用户在购入后要求索赔的情况下, 需要进行机床的诊断试验, 并拟订与实施补



救方案,而在此过程之初,采用振动分析往往会成为解决问题的直接契机。

### (b) 改良设计

积累有关故障检测与排除的实例,基于由此获得的经验,对现有机种或样机进行诊断试验与结构分析,以期提高其加工性能,并提出新的设计,亦不乏实例。

### (c) 生产检验

当进行主轴部件运转试验时,测定其振动,并加以分析等等。

## 2. 用于机床用户的加工现场

### (a) 夹具设计

工件因自身刚性不足而在加工中发生振动,往往成为机床使用中的问题。对于零件的设计向薄壁型发展的一些行业,在夹具设计中考虑其动态性能,将会对加工效率与精度的提高带来重大的效益。

### (b) 高性能刀具的使用

对于超硬钻头、超硬端铣刀以及陶瓷刀具等新型刀具来说,往往只有在抑制了振动以后,才能发挥其切削性能。

### (c) 难切削材料的加工

耐热合金等难切削材料加工中的主要问题在于刀具磨损快。为了采用陶瓷等高硬度刀具以延长刀具寿命,就必须抑制振动,以防止刀具崩刃,而使用圆形刀片对于抑制难切削材料加工时的振动是有效的。

### (d) 加工精度的提高

进行振动诊断,判明原因,以谋求改善,将有助于减弱已加工表面上出现的振动条纹与减小形状误差。

### (e) 生产中的应急措施

新投产的生产线可能会因夹具不合适,或镗杆刚性不足而发生振动,以致成为生产中的“瓶颈”。在重新设计、改善这些部分之前,采用变速切削或安装减振器来抑制振动,乃是可行的应急措

施。

#### (f) 设备诊断

欲将现有的滚齿机、坐标镗、磨床等贵重设备编入新设计的生产线，往往需要进行诊断试验，以确定其改造要点。

#### (g) 刀具损伤的自动检测

利用切削中的振动检测刀刃的磨损与破损，并加以显示，或自动停止加工，这种技术早已被试验过。此法单独使用，其准确度欠佳，而与其它检测方法配合使用，从而对刀具的损伤作出判断，则应当是现实可行的。

在可能提出的用于改善振动状况的技术对策中，并不存在能解决所有的振动问题的万灵措施，而必须根据诊断结果，判明振动类型及其原因所在，对症下药地采取有效的措施，而且尽可能综合采用各种措施。以下列举各种行之有效的对策。

### 技术对策

#### (a) 排除振源

如已判定发生问题的振动是属于强迫振动，则可找出振源所在，并采取诸如更换轴承、调整联轴器等措施。如果仍不能完全消除振源，则可调整加工条件，使振动不易在已加工表面上显现出来。

#### (b) 改变所使用的刀具

对于再生颤振的抑制，采用不易产生再生效应的刃形，以及正前角和小后角都是有效的。对于铣刀，采用不等齿距设计能有效地抑制再生颤振与断续切削引起的强迫振动。为抑制难切削材料加工时由于切屑形成周期性所引起的振动，可使用装有圆形刀片的车刀。对于砂轮，采用弹性支圈有利于抑制磨削过程中所产生振动的发展，这对于延长砂轮在下一修整之前的耐用度是有效的。

#### (c) 变换切削条件

对于再生颤振,采用低的切削速度、大的进给量;对于切屑生成的周期性所引起的振动,采用低的切削速度,小的进给量是能够有效地加以抑制的。对于断续切削激发的强迫振动,可采用提高或降低切削断续的频率的办法来加以抑制。

#### (d) 变速切削

对于车削或镗削中发生的再生颤振,可让切削速度不断变化,使工件或刀具在每一转中切削速度都在变化,这样也可抑制颤振。对于多刃回转刀具,采用变速切削法效果虽然较差,但这时采用不等齿距法是有效的,其道理与变速切削法是相通的。为了抑制磨削加工时振动的发展,以延长砂轮的寿命,可预先选定高、低两种速度,磨削时砂轮速度交替地在这两种速度之间切换,这种方法将是有效的。

#### (e) 机器安装方法的检查

改变机床的安装方式,或改变砂轮的转数,从而使磨床作为一个整体的刚体运动模态的固有频率与砂轮的转数相错开,将有利于减小振动,延长砂轮的寿命。进行断续切削的机床也有同样的问题。

#### (f) 使用减振器

由弹簧支持重物所形成的动力减振器或利用重物碰撞的冲击减振器都很好用。

#### (g) 工件夹具的优化设计

#### (h) 改变结构的设计

#### (i) 电气控制

采用机电一体化技术的振动控制技术尚处在研究阶段。以下列举有希望实用化的若干实例。

- 在磁力轴承超高速主轴系统中,已见采用电气控制方式来控制振动的实例。
- 利用带有电气控制装置的空气弹簧来隔离振动。
- 消除装配机器人停止时的残留振动。

●操作器运动控制的高速、高精度化。

在后两个实例中,对于机械结构的刚性不足的问题,采用前馈、适应控制以及最优控制等方法加以补救。这些技术有希望成为划时代的技术,但是由于种种原因,目前仍处在基础研究的阶段。

消除振动对于提高加工技术与发展机床技术来说,是重要的关键之一。最有效的方法是,对现有的故障进行诊断,并反复进行改善。但是在过去,由于缺乏科学整理出的、得以迅速实施的有效诊断技术,大量的振动问题都被搁置不顾,失掉了提高加工性能的许多机会。

现在,对于切削、磨削两方面的振动理论的系统解释已有进展,而以FFT分析仪为主体的实用电子分析装置已经普及,振动诊断的程序已经确立,无论是机床的制造者或用户也都在实践中增强了信心。

本书叙述必要的基础知识、实用的技术对策、振动诊断试验的方法与程序,以及结构数值分析的方法与实例。我的前一部著作给出了理论上的解说,而13年后出版的本书,但愿能够成为实际技术工作者的具体行动指南。

著 者

1990年5月

# 目 录

## 第一部分 基础篇

第一章 各种加工条件下的典型振动	(1)
1.1 切削加工中的激烈振动	(3)
1.2 妨碍精密切削加工的振动	(4)
1.3 断续切削加工时的振动	(5)
1.4 按发生机理对切削振动进行分类及相应的对策	(6)
1.5 磨削加工时的振动	(8)
第二章 振动理论梗概	(13)
2.1 结构的动态特性	(13)
2.1.1 模态分析理论	(13)
2.1.2 试验模态分析	(15)
2.2 再生颤振理论	(17)
2.2.1 再生效应(regeneration)	(17)
2.2.2 切削过程的动态特性	(18)
2.2.3 稳定性判据	(19)
2.3 切削时发生的各种振动的现象与对策	(22)
2.3.1 力干扰型强迫振动	(22)
2.3.2 位移干扰型强迫振动	(23)
2.3.3 自激振动	(23)
2.4 磨削时砂轮表面再生型振动发生的机理	(24)
2.4.1 磨削时的再生效应	(25)
2.4.2 再生效应的方框图	(27)
2.4.3 磨削力的几何非线性	(29)
2.4.4 振动频率的变动	(31)
2.4.5 抑制方法	(36)
第三章 振动的频率特征及实例	(38)
3.1 振动的频率特征	(38)

3.1.1	刚体运动模态的振动(低频范围,120Hz 以下)	(38)
3.1.2	特定部位的材料的变形所形成的振动模态(中频范围, 20~1000Hz)	(40)
3.1.3	高频振动(500~20000Hz)	(40)
3.2	磨床的刚体运动模态的振动	(40)
3.3	树脂水泥结构的试验铣床	(42)
3.4	薄壁工件的铣削加工	(44)
3.5	难加工材料车削时的高频振动	(45)
<b>第四章</b>	<b>振痕生成机理及其特征</b>	(50)
4.1	再生颤振的振痕	(50)
4.2	切屑生成的周期性引起的振痕	(51)
4.3	由主轴驱动系统引起的位移干扰型强迫振动的振痕	(52)
4.4	混合型振动的振痕	(53)
4.5	铣削加工时强迫振动的振痕	(55)
4.6	铣削加工时再生颤振的振痕	(57)
4.7	磨削加工时的振痕	(60)
<b>第二部分 对策篇</b>		
各种加工方法中振动的现象与抑制措施		
<b>第五章</b>	<b>车削加工中的振动</b>	(67)
5.1	车削中自激振动的抑制	(67)
5.1.1	改变机床结构系统的振动特性	(68)
5.1.2	合理选择切削刀具	(72)
5.1.3	切削条件的选择	(76)
5.1.4	变速切削法的应用	(79)
5.2	车削中强迫振动的抑制	(81)
5.2.1	断续切削中的振动	(81)
5.2.2	由切屑生成的周期性引起的振动	(82)
5.2.3	位移干扰型强迫振动	(85)
<b>第六章</b>	<b>镗削加工中的振动</b>	(87)
6.1	镗削中再生颤振的抑制	(87)

6.1.1	振动的测量方法 .....	(88)
6.1.2	镗孔深度与颤振的极限 .....	(88)
6.1.3	其他加工条件与颤振极限 .....	(89)
6.1.4	取向效应 .....	(91)
6.1.5	减振器的应用 .....	(93)
6.1.6	变速切削法的应用 .....	(95)
6.2	镗孔中的强迫振动 .....	(98)
6.2.1	回转误差的类型 .....	(99)
6.2.2	回转误差的测定方法 .....	(101)
6.2.3	强迫振动的抑制 .....	(102)
<b>第七章 铣削加工中的振动</b> .....		(107)
7.1	铣削加工中的再生颤振 .....	(108)
7.1.1	加工条件对颤振状态的影响 .....	(108)
7.1.2	铣削加工中再生颤振的抑制 .....	(113)
7.2	断续切削时的强迫振动 .....	(115)
7.2.1	特征 .....	(115)
7.2.2	断续切削时强迫振动的抑制 .....	(117)
<b>第八章 磨削加工中的振动</b> .....		(119)
8.1	由于砂轮表面粗糙度不均匀而产生的振动波纹 .....	(119)
8.1.1	双向修整砂轮 .....	(119)
8.1.2	砂轮修整时的再生颤振 .....	(128)
8.1.3	砂轮表面的再生型振动 .....	(130)
8.2	由砂轮、工件之间的相对位移引起的振动 .....	(132)
8.2.1	工件的再生型振动 .....	(132)
8.2.2	由砂轮表面的振摆而引起的磨削表面波纹 .....	(135)
8.2.3	外干扰型振动 .....	(143)
8.3	砂轮表面的再生型振动的抑制 .....	(144)
8.3.1	砂轮的动平衡调整 .....	(144)
8.3.2	变速磨削 .....	(147)
8.3.3	几何非线性作用的抑制 .....	(150)

### 第三部分 分析篇

(88)	振动分析的实用方法	1.1.8
(88)	振动分析的实用方法	2.1.8
(88)	振动分析的实用方法	2.1.8
<b>第九章</b>	<b>振动诊断的试验技术和实践</b>	<b>(155)</b>
9.1	切削加工中振动的实用诊断方法	(155)
9.1.1	实用诊断方法的概述	(155)
9.1.2	振动分析中使用的测试分析装置	(156)
9.1.3	振动分析试验的顺序	(158)
9.2	磨削加工中的诊断顺序和方法	(168)
<b>第十章</b>	<b>机床振动的诊断与控制的实例及要点</b>	<b>(172)</b>
10.1	诊断实例——树脂水泥铣床	(172)
10.1.1	机床的规格和结构概况	(172)
10.1.2	各试验项目的方法和结果	(174)
10.1.3	诊断试验的结果	(183)
10.2	由静刚度测试来评价加工性能	(185)
10.2.1	静刚度的测试方法	(185)
10.2.2	比较评价实例	(186)
10.2.3	改进点的分析实例	(189)
10.3	进给驱动系统的动态特性(仿形铣床)	(191)
10.4	由机械的安装调整进行抑振	(193)
10.5	由调整主轴的速度进行抑振	(197)
<b>第十一章</b>	<b>结构动态特性的计算机数字仿真技术</b>	<b>(204)</b>
11.1	结构动态分析方法的概要	(204)
11.1.1	计算原理概要	(204)
11.1.2	结构设计优化程序	(206)
11.1.3	主轴系统的结构设计	(207)
11.1.4	三维通用结构分析	(209)
11.2	结构动态特性仿真的应用实例	(210)
11.2.1	磁悬浮轴承铣床的主轴系统	(210)
11.2.2	树脂水泥铣床	(215)
11.2.3	多关节型机器人	(218)
11.2.4	直角坐标型机器人	(232)



第十二章 薄壁工件夹具的 CAD 系统 .....	(238)
12.1 典型实例 .....	(239)
12.2 研究的目的和方法 .....	(240)
12.3 基本程序 .....	(241)
12.4 由试验方法设计夹具 .....	(242)
12.5 由计算方法设计夹具 .....	(242)
12.6 实例 .....	(244)
附录 1 加速度、频率、位移振幅之间的关系 .....	(246)
附录 2 脉冲激振的实施步骤 .....	(248)
参考文献 .....	(250)