



装备科技译著出版基金

 Springer

Fault-Diagnosis Applications

Model-Based Condition Monitoring:
Actuators, Drives, Machinery, Plants, Sensors, and Fault-tolerant Systems



应用故障诊断学

——基于模型的故障诊断方法及其应用

[德] Rolf Isermann 著

朱康武 傅俊勇 房成 纪宝亮 左从阳 闫耀宝 译



国防工业出版社
National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

应用故障诊断学

——基于模型的故障诊断方法及其应用

Fault-Diagnosis Applications

**Model-Based Condition Monitoring: Actuators, Drives, Machinery,
Plants, Sensors, and Fault-tolerant Systems**

[德] Rolf Isermann 著

朱康武 傅俊勇 房 成

纪宝亮 左从阳 闫耀宝 译

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字：军-2016-146 号

图书在版编目 (CIP) 数据

应用故障诊断学：基于模型的故障诊断方法及其应用/ (德)
罗尔夫·艾思曼 (Rolf Isermann) 著；朱康武等译. —北京：国
防工业出版社，2017.7

书名原文：Fault-Diagnosis Applications—Model-Based Condition
Monitoring: Actuators, Drives, Machinery, Plants, Sensors, and Fault-
tolerant Systems

ISBN 978-7-118-11236-8

I. ①应… II. ①罗… ②朱… III. ①故障诊断—研究
IV. ①TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 156031 号

Translation from English language Edition

*Fault-Diagnosis Applications—Model-Based Condition Monitoring: Actuators, Drives, Machinery,
Plants, Sensors, and Fault-tolerant Systems*

by Rolf Isermann

Copyright © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011

Springer-Verlag is a part of Springer Verlag GmbH

All Right Reserved

本书简体中文翻译版由 Springer Verlag GmbH 授权国防工业出版社独家出版发行。

版权所有，侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 19¼ 字数 358 千字

2017 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 95.00 元

(本书如有印装错误，我社负责调换)

国防书店：(010) 88540777

发行邮购：(010) 88540776

发行传真：(010) 88540755

发行业务：(010) 88540717

译者序

本书是一部全面介绍基于模型的故障检测与诊断技术原理、方法及其工程应用的专著。作者 Rolf Isermann 工作于达姆施塔特工业大学自动化控制学院，曾任控制工程实验室主任。作者的研究方向主要包括非线性工业过程辨识、数字控制、自适应控制和故障诊断技术等，在基于模型的工业过程故障诊断及其应用技术领域具有极高的造诣。本书是作者对其 40 年来在故障检测与诊断技术领域工作成果的总结。

本书采用一种循序渐进、深入浅出的方式，向读者全面介绍了基于模型的现代故障检测与诊断技术的概念、理论、方法以及在多个领域中的具体应用技术。

对于航天、航空、兵器等军工领域，故障检测和诊断技术是核心技术之一。对于高科技武器系统，在系统中增加故障检测和诊断功能可以明显地提高系统可靠性和有效性。对于运载火箭等由几十个核心子系统和几十万个零部件组成的极端复杂产品，必须使用先进的故障检测、诊断和重构技术才能满足极高的可靠性指标要求。因而对先进故障诊断技术开展研究，对提高我国国防装备的总体技术水平具有重要意义。

希望本书的出版可以帮助读者解决工程研制中遇到的故障检测、诊断和容错设计的实际技术问题，并激发读者对故障诊断技术的研究兴趣，在未来工作中实际使用先进故障检测与诊断技术。

本书适用于从事航空、航天、兵器、机械、电子等产品研发、设计、生产和使用的广大科研人员，也可作为可靠性、机械电子工程、航空、航天等专业研究生的指导用书。此外也适用于所有对故障诊断和可靠性设计技术感兴趣的读者进行阅读。

由于译者的水平有限，因而在翻译过程中可能存在一些错误或翻译不当的地方，请读者见谅和指正。

译者非常感谢装备科技译著出版基金和国防工业出版社对本书出版提供的大力支持。

译者

2017. 1

前 言

随着对高价值和高风险生产过程自动控制系统的效率、质量和集成度的要求日益增加，系统监督（或监控）、故障检测和故障诊断系统在生产过程中扮演着越来越重要的角色。经典的监督方法主要是检查单个变量是否超过限定值，并进行报警。但如果可以对测量信号中隐藏的所有信息进行分析，并进行自动处理，就可以明显提高监督系统的性能。

经过几十年来的发展，学者们提出了很多新的故障检测和诊断方法，并开展了详细的理论和试验研究。故障检测与诊断的区别在于，故障检测仅用于识别故障的发生，而故障诊断则是找到故障发生的原因和位置。先进故障检测方法基于数学信号和过程模型，通过对工作原理的分析和建模从而生成故障征兆。故障诊断方法使用统计决策、人工智能和软件计算等方法根据故障与故障征兆之间的因果关系对故障进行诊断。因此，高效的监督、故障检测和诊断系统是一个需要综合运用物理原理、试验技术和计算软件的具有挑战性的新兴研究领域。相关研究课题也被称为状态监控、故障检测和分离（FDI）或故障检测和诊断（FDD）。

故障管理或资产管理是更进一步的研究领域。这意味着可以通过早期故障检测和基于过程状态的维护或维修以避免故障导致的关机。如无法避免突然的故障、失效和误动作，就必须使用容错系统。通过使用故障检测和冗余元器件进行系统重构等方法，可以避免在高风险过程中出现事故。

作为《故障诊断系统——从故障检测到故障容错技术导论》的后续书籍，本书详细介绍了故障检测和诊断方法在不同技术过程和产品上的应用实例。

本书给出的故障检测和诊断方法及其试验成果，来自于从1975年起达姆施塔特工业大学自动化控制学院（Institute of Automatic Control of the Darmstadt University of Technology）及其工业领域合作伙伴的相关研究成果。通过这种合作方式，理论研究成果可以在实际应用中进行测试，试验结果对后续技术改进提供了方向并产生新的技术灵感。因此，本书给出了针对大约20种研究对象的主要研究结果。研究对象包括电动机、执行器、机床、泵、管路和热交换器等（针对内燃机的故障检测和诊断理论及其应用成果将发表于《发动机控制与诊断》一书中）。

本书介绍了故障诊断和容错技术在电子工程、机械、化工以及计算科学等领域中的应用。本书适用于本科生、研究生以及相关领域的工程技术人员。学

习本书所需要的前期基础知识主要包括大学本科水平的系统原理、自动控制、机械和电子技术。

作者由衷感谢那些自 1975 年以来,对本书所涉及的研究领域提供了大量理论和应用研究成果的研究者们。他们是 H. Siebert, L. Billmann, G. Geiger, W. Goedecke, S. Nold, U. Raab, B. Freyermuth, St. Leonhardt, R. Deibert, T. Höfling, T. Pfeufer, M. Ayoubi, P. Ballé, D. Füssel, O. Moseler, A. Wolfram, M. Münchhof, F. Haus 和 M. Beck。

最后, 特别感谢 Brigitte Hoppe 在本书文字编写、制图、制表和校对出版等工作上的勤劳工作, 以及 Springer – Verlag 出版社的大力支持。

Rolf Isermann
达姆施塔特, 2010, 9

目 录

第一部分 监督、故障检测和诊断

第1章 绪论	2
1.1 自动控制系统及其过程监督/状态监测	2
1.2 产品生命周期和故障管理(资产管理)	4
1.3 主要内容	7
第2章 监督、故障检测和诊断方法简介	9
2.1 监督的基本任务	9
2.2 术语	14
2.2.1 故障、失效和失灵	14
2.2.2 可靠性、安全性、有效性	16
2.2.3 容错和冗余	17
2.3 基于知识的故障检测和诊断方法	18
2.3.1 解析式故障征兆生成	18
2.3.2 启发式故障征兆生成	20
2.3.3 故障诊断	20
2.4 基于信号的故障检测方法	20
2.4.1 阈值校验方法	21
2.4.2 趋势校验方法	21
2.4.3 使用二元阈值的特征值变化检测方法	22
2.4.4 自适应阈值方法	23
2.4.5 似真校验方法	23
2.4.6 信号分析方法	24
2.5 基于过程模型的故障检测方法	25
2.5.1 过程模型和故障建模	26
2.5.2 使用参数估计的故障检测方法	28
2.5.3 使用状态观测器和状态估计的故障检测方法	29
2.5.4 使用一致性方程的故障检测方法	32
2.5.5 非测量变量的直接重构	33

2.6	故障诊断方法	34
2.6.1	分类方法	34
2.6.2	推理方法	35
2.7	闭环系统中的故障检测及诊断	35
2.8	监督(条件监控)的数据流结构	37
2.9	小结	38

第二部分 驱动与执行器

第3章	电动机的故障诊断	42
3.1	直流电动机	42
3.1.1	直流电动机结构和模型	42
3.1.2	使用一致性方程的故障检测方法	45
3.1.3	使用参数估计的故障检测方法	47
3.1.4	故障检测试验结果	47
3.1.5	使用自学习故障征兆树方法的故障诊断试验结果	49
3.1.6	小结	54
3.2	交流电动机	55
3.2.1	感应电动机的结构和模型(异步电动机)	55
3.2.2	基于信号的功率电子故障检测	57
3.2.3	基于模型的交流电动机故障检测	61
3.2.4	小结	67
第4章	电动执行器的故障诊断	70
4.1	电磁执行器	71
4.1.1	位置控制	71
4.1.2	使用参数估计的故障检测方法	74
4.2	汽车电子节气门执行器	75
4.2.1	执行器结构和模型	76
4.2.2	质量控制的测试循环	78
4.2.3	使用参数估计的故障检测	78
4.2.4	使用一致性方程的故障检测	81
4.2.5	故障诊断	82
4.2.6	故障诊断设备	83
4.2.7	小结	84
4.3	无刷电动机和飞机机舱压力控制阀	85
4.3.1	结构和模型	85

4.3.2	使用参数估计的故障检测	87
4.3.3	使用一致性方程的故障检测	87
4.3.4	小结	89
第5章 流体执行器故障诊断		90
5.1	线性液压伺服执行器	90
5.1.1	线性液压伺服执行器结构	91
5.1.2	线性液压伺服执行器故障	92
5.1.3	滑阀和液压缸模型	95
5.1.4	阀和液压缸的故障检测和诊断	98
5.1.5	小结	103
5.2	气动执行器	104
5.2.1	气动执行器组成	105
5.2.2	气动阀门故障	107
5.2.3	气动阀门模型	107
5.2.4	使用阀位特性的故障检测	109
5.2.5	使用气动位置控制器的流量控制阀门故障检测	111
5.2.6	具有电子位置控制器的流量控制阀门故障检测	118
5.2.7	小结	119

第三部分 机械与设备

第6章 泵的故障诊断		122
6.1	离心泵	122
6.1.1	泵的监督和故障诊断技术现状	122
6.1.2	离心泵和管路系统模型	124
6.1.3	使用参数估计的故障检测	128
6.1.4	使用非线性一致性方程和参数估计的故障检测	135
6.1.5	使用振动传感器的故障检测	142
6.1.6	小结	144
6.2	往复式泵	145
6.2.1	往复式隔膜泵结构	145
6.2.2	往复式隔膜泵模型	146
6.2.3	液压泵的故障检测和诊断	148
6.2.4	泵传动系统的故障检测	151
6.2.5	小结	153

第7章 管路泄漏检测	154
7.1 管路监督技术发展现状	154
7.2 管路模型	155
7.3 基于模型的泄漏检测	159
7.3.1 使用状态观测器的泄漏检测	160
7.3.2 使用质量平衡和相关性分析的液体管路泄漏检测	162
7.3.3 气体管路的泄漏检测	166
7.4 试验结果	171
7.4.1 汽油管路	171
7.4.2 气体管路	173
7.4.3 小结	173
第8章 工业机器人故障诊断	174
8.1 六轴工业机器人结构	174
8.2 机器人关节模型及参数估计方法	175
8.3 解析和启发式诊断知识	176
8.3.1 故障征兆表示	176
8.3.2 诊断知识表示	177
8.3.3 机器人的故障、启发式故障征兆和事件	178
8.4 试验结果	179
8.4.1 使用解析知识的故障诊断	180
8.4.2 使用解析和启发式知识的故障诊断	181
8.5 小结	182
第9章 机床的故障诊断	183
9.1 机床结构	183
9.2 机床监督技术现状	185
9.3 主传动	187
9.3.1 双质量模型	187
9.3.2 参数估计	188
9.3.3 使用参数估计的故障检测方法	190
9.4 进给传动	190
9.4.1 双/三质量模型	190
9.4.2 进给传动系统辨识	192
9.4.3 进给传动故障检测方法台架试验	195
9.5 钻床	198
9.5.1 钻削过程模型	198

9.5.2	钻床的故障检测	199
9.6	铣床	201
9.6.1	铣削加工过程模型	201
9.6.2	刀具的故障检测	206
9.7	磨床	212
9.7.1	磨削加工模型	212
9.7.2	使用参数估计的故障检测	214
9.7.3	使用信号分析方法的故障检测	215
9.8	小结	216
第10章	热交换器的故障检测	217
10.1	热交换器及其模型	217
10.1.1	热交换器类型	217
10.1.2	热交换器稳态模型	219
10.1.3	热管的动态模型	221
10.2	针对静态特性的故障检测	226
10.2.1	热交换器静态特性	226
10.2.2	故障检测方法	227
10.3	使用动态模型和参数估计的蒸汽/水热交换器故障检测	229
10.3.1	使用线性动态模型和参数估计的故障检测	230
10.3.2	使用局部线性化动态模型的故障检测	232
10.4	小结	235

第四部分 冗错系统

第11章	冗错系统 - 简介	238
11.1	基本冗余结构	238
11.2	余度降级	240
第12章	冗错系统应用	242
12.1	冗错控制系统	242
12.2	电动驱动系统的故障冗错	245
12.2.1	一种具有冗错功能的双联交流电动机	245
12.2.2	逆变器故障冗错	249
12.2.3	多相电动机	251
12.3	故障冗错执行器	251
12.3.1	故障冗错液压执行器	252
12.3.2	故障冗错直流机电执行器	257

12.4	故障冗错传感器	259
12.4.1	传感器硬件冗余	259
12.4.2	传感器解析冗余	260
12.4.3	方向盘角度传感器	262
12.4.4	故障冗错流量传感器	262
12.4.5	故障冗错电子节气门	263
12.4.6	基于模型的解析冗余虚拟驾驶动态传感器	265

第五部分 附录

第13章	故障检测及诊断术语	268
总结		272
参考文献		274

第一部分

监督、故障检测和诊断

第 1 章 绪 论

自 20 世纪 60 年代, 自动化技术越来越多地应用于电力能源、化工系统和机械制造等工业过程中。对自动化技术的需要主要来自于人们对过程控制质量、产品质量的要求越来越高, 并希望将人类从单调而繁重的工作中解脱出来, 同时也是为了降低不断增长的人工成本所带来的压力。1975 年左右, 出现了相对便宜且可靠的微型计算机, 从而可以在单台设备上解决大多数控制问题, 从此工业的自动化程度出现了突飞猛进的发展。与此同时, 传感器、执行器、总线通信技术和人机交互技术也得到了快速发展。当然, 对于被控对象工作原理和自动控制技术的理论突破, 在自动技术发展浪潮中同样扮演着重要角色。

自动化技术的快速发展同样促进了汽车、飞机、高精密机械设备和机械电子设备等高技术设备的自动控制能力。

下面将首先对自动控制系统的结构以及自动监督/状态监测在整个系统中所扮演的角色进行描述, 随后对故障管理和资产管理在整个产品生命周期中的任务进行简单介绍。

1.1 自动控制系统及其过程监督/状态监测

图 1.1 为具有多级信息处理功能的自动控制系统原理框图。底层由顺序控制、前馈和反馈控制组成。监督系统可以认为是中间级。更高的级别则主要完成协调、优化和综合管理等全局控制任务。人机交互界面则对自动控制系统中的重要信息进行显示。

大多数控制系统结构为数字式顺序控制结构和数字/模拟式反馈控制结构。反馈控制系统的原理、设计和应用已有大量的研究成果, 特别是包括状态观测器、参数估计和非线性补偿在内的基于模型的控制技术得到了快速的发展。同时, 动态系统和信号处理等现代控制理论对自动控制技术的发展起到了巨大的推动作用, 从而可以对很多原本由于特性较复杂而难以控制的被控对象进行较好的控制。

但当实现了较好的自动控制功能后, 将不再需要人的操作, 因此监督功能就变得尤为重要。操作人员不仅仅只根据设定值和时序进行控制、操纵, 更重

要的是可以对整个控制过程的状态进行监督和管理。因此，在增强底层控制功能的同时，必须对监督功能进行提高和改进。

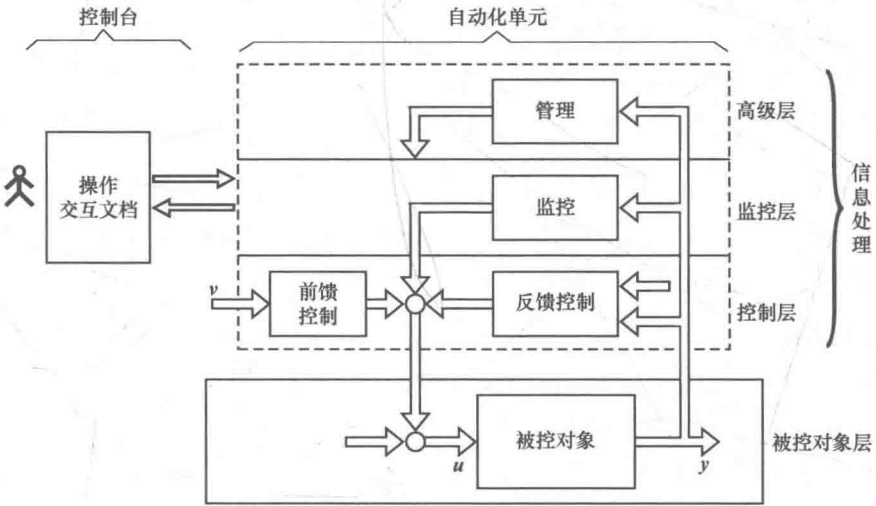


图 1.1 过程自动化系统简化框图

提高监督功能的另一个原因是随着控制系统被集成到被控对象中，使得被控对象和控制系统组成了一个独立的自治单元。例如电传飞机和汽车等机电系统。此时，执行器、传感器和控制器等控制系统组成部件的故障不仅影响控制性能，还将严重影响系统可靠性和安全性。对于安全性有严格要求的系统，应立刻将系统中的故障向操作人员（飞行员、驾驶员）进行显示和报警，并立刻由故障管理系统激活活错或重构系统。

过去，通常通过对力、速度、压力、液位和温度等重要过程变量进行阈值校验的方法实现自动监督功能。对于安全性有严格要求的系统，当被监控变量的值超过预先设定的阈值后将触发故障警报，再由操作人员或自动保护系统实施保护操作。在多数情况下，该方法足以防止出现较大的故障和破坏。但使用这种简单的阈值校验方法时，故障的检测存在滞后，并且几乎不可能实现高级的故障诊断功能。而对于现代系统理论方法，通过系统地使用系统模型、信号模型、辨识和估计以及人工智能等方法，可以开发出更为先进的故障检测和诊断方法，从而对系统早期微小故障进行检测并对故障位置进行诊断，该方法也被称为状态监测。过程监督 and 状态监测的目标主要包括：

- (1) 增加可靠性和有效性；
- (2) 增加安全性；
- (3) 对闭环系统中的执行器、被控对象、传感器和零部件的故障进行检测和诊断；
- (4) 对被控过程的瞬态状态进行监督；

- (5) 根据被控过程的状态实施维护和维修工作;
- (6) 产品制造过程的深度质量控制;
- (7) 远程故障检测和诊断;
- (8) 作为资产管理和故障管理的基础;
- (9) 作为容错和重构系统的基础。

上述先进的故障检测和诊断方法见文献 [1.1 - 1.5, 1.9]。在本书第2章中将对这些方法进行总结。

1.2 产品生命周期和故障管理（资产管理）

能源的短缺与原材料价格的增长，催生了制造和产品生产过程的优化研究。因此，对产品和制造过程的整个生命周期进行研究变得越来越重要。图 1.2 为产品和设备生命周期的简化框图。首先，对产品（例如较复杂组件、机器或汽车的零件等）进行计划、设计、开发和制造。对于这些制造过程，需要自动化的控制、监控、质量控制（具有反馈机制的质量检测）和优化。然后，将不同种类的产品组装成更大规模的生产设备，以生产诸如电力、化工产品、矿产和煤炭等能源和材料。设备试运行结束后，设备进入常规的连续生产模式。设备及其生产过程需要自动控制、自动在线优化和自动监督功能。在生产过程设备的生命周期内，需要对生产过程设备进行多次改造。当其寿命结束后，需要对生产过程设备进行拆除，并对拆卸下来的零部件进行销毁或回收处理。

很多回收的零部件可以直接或修复后用于新的产品制造。因此，需要对产品制造和设备生产过程进行监督和诊断，以确保产品质量并节约投资。监督功能对表针工作状态的可测量量进行观测，因而也被称为状态监测或健康度监测。监督功能同时也可以对设备的工作过程和控制性能进行观测，对设备磨损状况进行测量并对设备剩余寿命进行估计。

如果可以对产品或生产过程中的故障进行预计或检测，则可以开展后续的维护、维修或重新配置等故障管理流程。图 1.3 列出了一些计划性的和临时性的维护和维修方法^[1.6]。计划性的维护基于固定的时间周期和/或固定的运行时间。而如果可以根据实时观测的真实状态开展维护工作，则可以放弃常规的计划性维护。计划性的维修通常是在预先设定的大修期内进行，而临时性的维修通常是在零件故障时临时启动的。如果已经预先设计了容错系统，就可以使用冗余零部件对系统进行重构。因此，维护过程用于预防故障，维修过程则用于消除故障，而重构过程则是通过使用备份零部件，以牺牲一定的性能为代价阻止故障的发生。

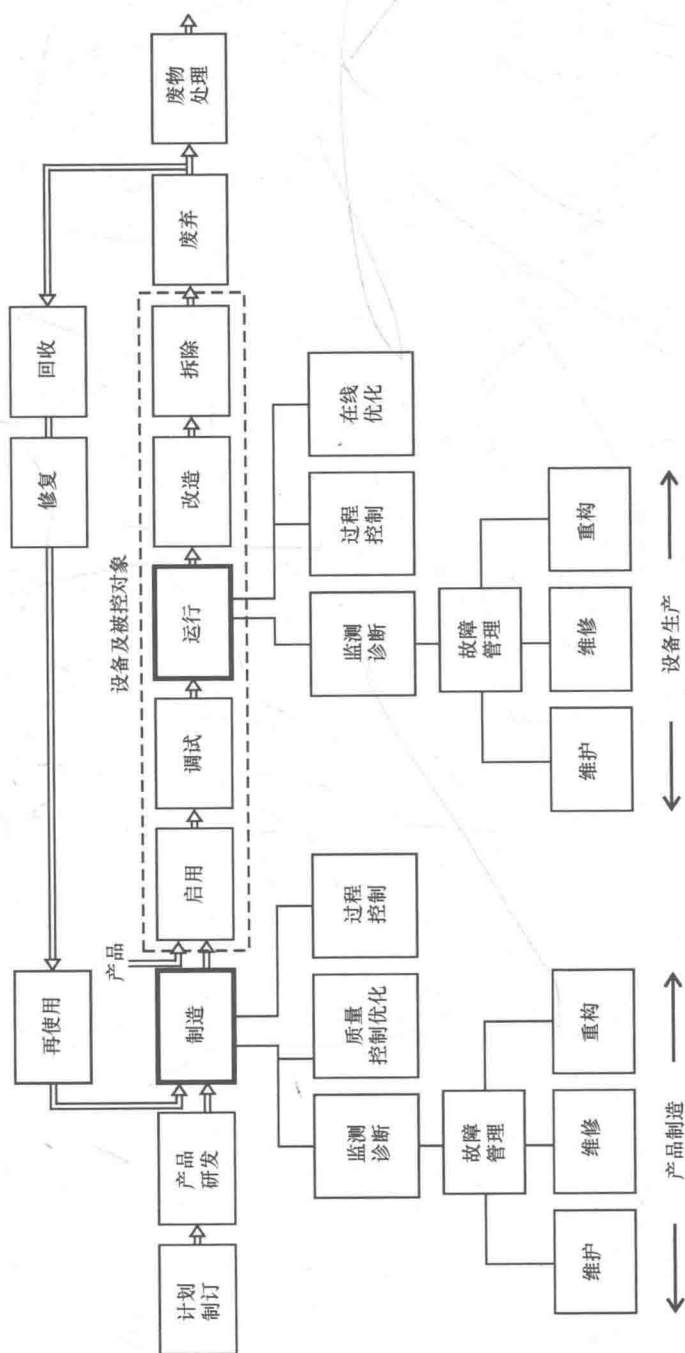


图 1.2 产品和设备生命周期简化框图