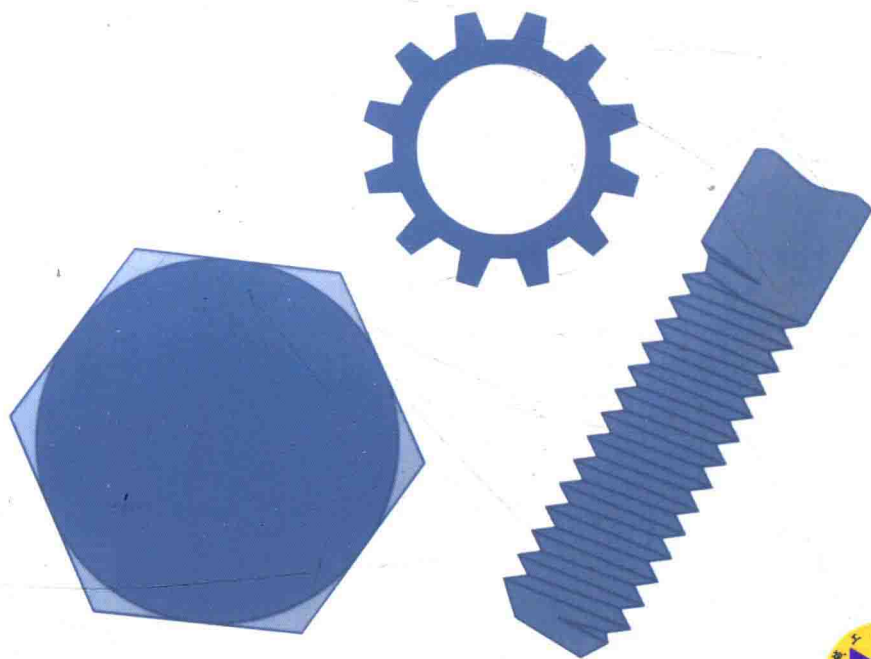


螺纹紧固件联接工程

[日] 酒井智次 著
柴之龙 译



 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS

螺纹紧固件联接工程

[日] 酒井智次 著
柴之龙 译



机械工业出版社

本书概述了在螺纹联接的设计和评估时应注意的基本原理及相关事项。内容包括螺纹联接设计的基本过程、螺纹联接的故障现象、螺纹联接的原理、螺纹联接设计中所涉及的知识、联接设计可靠性测试过程中需要注意的事项、导致螺纹联接故障原因的关键点、螺纹联接检查方法以及常用的螺栓、螺母之外的其他紧固件的联接方法；详细介绍了螺纹联接设计计算实例。为便于理解，本书尽可能避免了偏重于严密性的细致描述以及特殊情况的记述，把理解螺纹联接的通用基础知识作为第一目标。

本书的内容是作者在丰田汽车公司长期工作所获得的知识和经验。

増補 ねじ締結概論

Copyright © 2014 by Yokendo Ltd.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means whatsoever without written permission from the publisher.

The Chinese edition Copyright © 2015 by China Machine Press.

This title is published in China by China Machine Press with license from Yokendo Ltd. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR, Macao SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书由养贤堂授权机械工业出版社在中国境内（不包括香港、澳门特别行政区以及台湾地区）出版与发行。未经许可之出口，视为违反著作法，将受法律之制裁。

本书中文简体版由养贤堂株式会社授权机械工业出版社独家出版发行。

版权所有，侵权必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字：01-2015-2376 号。

图书在版编目（CIP）数据

螺纹紧固件联接工程/（日）酒井智次著；柴之龙译。—北京：机械工业出版社，2016.1

ISBN 978-7-111-52157-0

I. ①螺… II. ①酒…②柴… III. ①紧固件—螺纹联接 IV. ①TH131

中国版本图书馆CIP数据核字（2015）第271102号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号 邮政编码100037）

策划编辑：孙鹏 责任编辑：孙鹏

责任校对：丁丽丽 封面设计：陈沛

责任印制：乔宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2016年4月第1版第1次印刷

169mm×239mm·13.75印张·2插页·265千字

标准书号：ISBN 978-7-111-52157-0

定价：58.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
电话服务 网络服务

服务咨询热线：010-88361066

机工官网：www.cmpbook.com

读者购书热线：010-68326294

机工官博：weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网：www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网：www.cmpedu.com

序

众所周知，螺纹紧固件是机械基础件中最广泛采用的紧固联接零件之一，无地不现，无处不用，它具有较强的通用性、可靠性、互换性，也是重要的安全联接件之一。因而如设计和选择不当，会导致联接件松动、失效、损坏、泄漏等故障出现，造成停机、停工、停产，甚至导致机毁人亡，发生重大人身财产损失，因螺纹紧固件失效引发的事故屡见不鲜。

当今，中国经济已进入新常态，必将加快现代工业化步伐，关键是创新，而螺纹紧固件又是工业配套的关键基础件之一。必须紧紧围绕中国制造 2025，一带一路国家发展战略，加快中国紧固件创新驱动，转型升级，产品要向高强度、高精度方向发展，要从中国紧固件制造向中国紧固件创造方向转变。为此，我们除了经验积累相辅助外，更需要理论和实践相结合的科技专业知识和理论予以指导。《螺纹紧固件联接工程》一书就是难得的一本教科书。本书作者长期在日本丰田汽车公司工作，积累大量的数据和实例，并结合相关专业理论知识，上升到理论高度，对螺纹联接原理、螺纹联接设计、螺纹联接的故障和可靠性试验，以及螺纹联接检查方法和常用紧固件联接方式做了深入分析研究，详细介绍了螺纹联接设计实例，通俗易懂。给从事紧固件专业和制造专业的人员提供了一本有价值的参考书，具有很好的指导作用，同时对广大螺纹紧固件使用者也是一本有益的工具书。

借此，我们对本书作者表示衷心的感谢！同时我们更应感谢柴之龙将该书翻译出版。柴先生是中国第一汽车集团公司资深专家，长期从事螺纹紧固件的设计实验和研究，将丰富经验和专业知识融汇于该书的翻译中，通过对该书娴熟和专业的翻译，在作者与读者之间架起了一座贯通的桥梁。

愿广大专业技术人员和读者能喜欢这本书！

中国机械通用零部件工业协会紧固件分会会长



二〇一五年十二月

译者的话

各种机械的许多可靠性问题均源于螺纹紧固的联接，特别是，现代重要的机械装置，如飞机、舰船、汽车、机车车辆、工程机械、重大机械装备和钢结构等，更是如此。现代机械几乎离不开螺纹紧固件的联接，甚至在某些关键领域（包括天上、陆地和水下的尖端装备），螺纹紧固件联接的技术具有不可替代性。

改革开放 30 多年，我国通过引进、技术消化和自主开发，在许多方面取得了很大进步。不过，大量的实证也使我们清醒地认识到，尽管我国现在已能制造不少“大总成”，但这些“总成”内的关键部件并不一定能够制造、关键技术并不真正充分地掌握，离“知其然并知其所以然”还有很大的距离。大量的实践表明，我国基础工业的工艺积累和关键性技术掌握与发达国家的差距不小，螺纹紧固件联接的相关技术就是其中之一。

“他山之石可以攻玉”，翻译、介绍《螺纹紧固件联接工程》一文，就是为促进我国“螺纹紧固联接技术”的深入研究，提高该技术的应用水平，为我国“由制造大国迈向制造强国”奉献自己的努力。

酒井智次博士在螺栓联接工程方面有许多研究成果，并获得多项重要奖项，本书汇集了作者本人和国际上著名的研究成果，详细介绍了螺纹联接的设计、制造及装配技术，提供了各种情况下螺纹紧固件的正确联接；通过实际练习阐述了螺栓联接的计算。对于工科学生，尤其是年轻的专业人员，本书提供了广泛的专业知识以及螺纹紧固件正向设计开发的方法，对于经验丰富的工程师来说，该书所提供的专业知识以及丰富的试验数据，对其工作也是会有帮助的。

能够翻译这本书是我的荣幸，这得益于日本青山制作所（AOYA MA SEI-SAKUSHO CO., LTD.）大力帮忙和协助，特别要感谢的是日本青山制作所杉山先生、卢一萌女士以及涩谷先生，是他们与酒井先生沟通交流后，酒井先生授权给我，作为本书的译者，在翻译过程中，我如履薄冰，生怕有违作者的原意。

参与本书译文的校对工作的有：泛亚汽车技术中心的叶又、上海柴油机股份有限公司的劳国强、上海大众汽车有限公司的季洋海，全书由我的老领导张英才先生完成最终的校对工作。本书得以出版，还要感谢德国 SCHATZ 公司 CEO SCHATZ 博士，德国 Zwick 公司中国办事处李维伦博士，SCHATZ 公司中国办事处郭林健先生的大力支持。

感谢同事（李琨、裕莉莉、张薇）的无私帮助，许多细节工作都是在他们的帮助下完成的，由于时间比较紧张，加之译者水平有限，译文中难免有不当之处，敬请读者批评指正。

译者

前 言

几乎所有装置都会使用螺纹紧固件，所以螺纹紧固件联接技术是确保机械系统可靠性的最重要技术之一。

因为频繁使用，螺纹紧固件已成为最标准化的部件之一，也就是说，可以根据螺栓的尺寸（名义直径、长度、头部形状等）及其强度等级创建零件目录表，需要时，只要从目录表中选择适合的螺栓即可。因此，即使螺栓本身的具体形状和强度还未按其功能和强度要求来确定，那也可以通过“选择”就“设计”出来，所以说螺栓是非常方便设计的零部件。

如果选择是在完整的设计计算之后进行，并且注意到了细节，那是没有问题的。但实际上很多情况下只是进行了简单的选择。例如，在很多情况下，选择往往只是基于直觉或者感觉、与类似产品或成功机型相比较以及模仿知名的和/或深受欢迎的产品。如果选择了过高性能的螺栓，不会出现什么问题；但如果选择了可能会导致松动、损坏或泄漏的螺栓，则可能会导致设备在使用期间出现故障，有时会出现更加严重的后果。

此外，也许因为螺纹紧固件是太常见的零部件，工程师们往往不会特别关注螺纹紧固件，尤其是当他们设计或拧紧螺纹紧固件时。

即使要可靠地进行螺纹紧固件联接的设计，工程师们还不完全了解应当研究哪些方面的问题和如何去研究。因此，掌握螺纹紧固件联接的技术和知识往往是很困难的。

由于上述原因，仍然有许多与螺纹联接有关的技术问题还没有得到解决，其中有一些是反复出现的问题。

基于上述背景，为了提高螺纹联接的可靠性，本书概述了在螺纹联接的设计和评估时应注意的基本原理及其他相关事项。

在本书中，第1章首先介绍了螺纹联接设计的基本过程，这样能对螺纹联接设计的整个过程有所了解。第2章列举了“螺纹联接的故障现象”，明确了螺纹联接系统设计时必须研究的项目。通过在开端部分就清楚地罗列出螺纹联接的所有故障现象，让读者知道在螺纹联接系统的设计和测试时要做的事情。第3章介绍了螺纹联接的原理，以及简明地叙述了螺纹联接设计中所涉及的知识。第4章使用了第3章给出的基本结论，对在一个具体的螺纹联接设计过程中如何避免第2章描述的所有螺纹联接故障现象进行了详细说明。第5章介绍了联接设计可靠性测试过程中需要注意的事项，分析了导致螺纹联接故障原因的关键点。第6章

简要说明了螺纹联接检查方法；第7章简要介绍了常用的螺栓、螺母之外的其他紧固件的联接方法；最后，第8章和第9章详细介绍了螺纹联接设计计算实例。

为便于理解，尽可能避免了偏重于严密性的细致描述以及例外事项的记述，把理解螺纹联接的通用基础知识作为第一目标。要了解更多细节和螺纹联接的基本知识，请参阅参考文献。

第3章“螺纹紧固件的基本原理”涉及许多在以往出版的其他文献中介绍过的内容。其他章节所介绍的重要的知识，是作者在丰田公司长期工作经验的积累，而这些章节的内容没有被其他以往发表的文献系统地描述过。如上面所提到的，根据个人的知识和经验确定第1章和第2章的内容和安排，以后章节的顺序是先理解基本过程，然后了解有关螺纹联接的所有故障和主要问题的解决。希望读者在读了这本书后，能够加深对螺纹联接本质的理解，提高设计和评价的质量，解决许多故障的根源，进而提高螺纹联接的可靠性。

在写本书过程中，作者参考了由Yamamoto编写的《螺纹联接的理论与计算》《螺纹联接的原理与设计》，由Yamamoto主编的《螺纹联接设计要点》，以及VDI 2230第一一部分的部分内容，在这里对他们表达我衷心的感谢和敬意。

本书的内容是我在丰田汽车公司长期工作所获得的知识和经验，这里要感谢丰田汽车公司允许这本书的出版。此外，在此我还要感谢丰田汽车公司的总经理酒井敏光先生，感谢他对本书的推荐出版和一直以来的大力支持。

本书献给我早逝于第二次世界大战的父亲、悉心指导我成长的母亲和一直坚定不移支持我的贤淑妻子。

酒井智次

目 录

序	
译者的话	
前言	
第1章 螺纹联接设计的基本过程	1
第2章 螺纹联接的故障现象	3
2.1 拧紧过程中的故障	3
2.2 拧紧过程后的故障	4
2.3 故障的特点和原因	5
第3章 螺纹紧固件的基本原理	7
3.1 螺纹紧固件的力学原理	7
3.1.1 斜面原理	7
3.1.2 紧固扭矩与螺栓轴向预紧力之间的关系	8
3.1.3 螺栓轴向预紧力与螺栓、被联接件的弹性变形之间的关系	12
3.1.4 外加载荷和施加在螺栓上的载荷之间的关系	14
3.1.5 螺栓和被联接件的弹簧常数	19
3.2 螺纹紧固件的装配	24
3.2.1 轴向预紧力作用下螺栓的屈服	24
3.2.2 扭矩(紧固)法	27
3.2.3 塑性区紧固法	29
3.2.4 其他装配方法	31
3.3 螺栓的静态失效	32
3.3.1 螺栓的拉伸断裂	32
3.3.2 螺栓的剪切断裂	32
3.4 螺栓的疲劳断裂	33
3.4.1 疲劳断裂	33
3.4.2 螺纹的疲劳断裂	34
3.4.3 偏心载荷作用下的系统形变图	35
3.4.4 螺纹的疲劳极限	36
3.5 螺纹失效	38
3.6 螺栓的延迟断裂	43
3.7 被联接件的分离	45
3.8 被联接件的滑动	46
3.9 螺栓松动	47
3.9.1 旋转松动	47
3.9.2 非旋转松动	57
3.9.3 防松措施	67
3.10 螺纹规格	72
3.10.1 螺纹的基本形状	72
3.10.2 螺纹牙底的形状	73
3.10.3 外螺纹的应力面积	73
3.10.4 支承面面积	74
3.10.5 螺栓和螺母的力学性能	74
3.10.6 螺栓头下圆角半径	76
第4章 螺纹联接设计方法	77
4.1 确定作用在机器(系统或部件)上的载荷	78
4.2 计算作用在螺纹联接系统上的载荷	79
4.3 将螺纹联接系统上的载荷分解成剪切载荷分量、拉伸载荷分量和偏心量	79
4.4 防止各种问题发生的研究	79
4.4.1 与剪切载荷 W_s 有关的研究	79
4.4.2 (纯)拉伸载荷的研究	83
4.4.3 偏心拉伸载荷的研究	85

- 4.5 螺栓尺寸、螺栓强度和紧固扭矩的确定 86
- 4.6 对过度拧紧和应力腐蚀开裂的研究 88
- 4.7 使用样件进行功能验证试验 89
- 第5章 螺纹联接可靠性评价方法** 90
- 5.1 样品的条件 90
- 5.2 试验载荷 91
- 5.2.1 概述 91
- 5.2.2 最大保证载荷 91
- 5.2.3 防滑保证载荷 91
- 5.2.4 防松保证载荷 91
- 5.2.5 防分离保证载荷 92
- 5.2.6 防疲劳保证载荷 92
- 5.2.7 温度 92
- 5.3 故障分析迹象 92
- 5.3.1 是否拧紧 92
- 5.3.2 螺栓失效原因 93
- 5.3.3 松动及其原因研究 93
- 5.4 故障特征 99
- 5.4.1 剪切载荷作用下的旋转松动 99
- 5.4.2 拉伸载荷作用下的螺栓疲劳断裂 100
- 5.4.3 蠕变(应力松弛)引起的松动 100
- 5.5 松动的测量方法 101
- 5.5.1 残余扭矩的测量方法 101
- 5.5.2 螺栓和螺母的松动角度测量方法 102
- 5.5.3 弹簧垫圈上升量测量方法 103
- 5.5.4 检查旋转和滑动存在的方法 103
- 5.5.5 残余轴向预紧力的测量方法 104
- 5.6 轴向预紧力的测量方法 104
- 5.6.1 使用超声轴向预紧力测量仪的方法 104
- 5.6.2 使用螺栓贴应变片的测量方法 106
- 5.6.3 使用压力传感器的方法 108
- 5.7 螺纹紧固件摩擦系数的测量方法 109
- 5.7.1 样品 109
- 5.7.2 测量装置 109
- 5.7.3 拧紧速度 110
- 5.7.4 螺纹摩擦系数、支承面摩擦系数和总摩擦系数的计算 110
- 第6章 螺纹联接的检查方法** 113
- 6.1 紧固扭矩和检查扭矩之间的关系 113
- 6.2 紧固扭矩的检查 114
- 6.3 紧固扭矩的监测和记录 114
- 6.4 根据轴向预紧力进行的检查 114
- 第7章 各类螺纹紧固件的使用** 116
- 7.1 垫片 116
- 7.1.1 垫片的承载表面功能 117
- 7.1.2 垫片的隔离功能 117
- 7.1.3 弹簧垫圈的弹簧功能 118
- 7.1.4 垫片的必要性 120
- 7.2 双头螺柱 120
- 7.3 自攻螺钉 121
- 7.4 止动部件 122
- 7.4.1 螺纹阻力型止动 123
- 7.4.2 机械式止动 124
- 7.4.3 支承面阻力型止动 125
- 7.4.4 胶粘剂 125
- 7.4.5 如何评价止动部件的性能 125
- 7.5 双螺母 128
- 7.6 粗牙螺纹和细牙螺纹 128
- 7.7 支承面角度 129

第 8 章 螺纹设计计算实例	131	附图 13 ~ 18 小六角头螺栓 (细牙) 的 $T-F-\mu-\sigma_y$ 图	191 ~ 194
8.1 承受剪切载荷的连接系统: 曲轴 和飞轮之间的联接	131	附录 B 附表	194
8.2 承受扭转载荷的连接系统: 曲轴 和带轮之间的联接	137	附表 1 螺纹中径、底径、应力面积 (A_s) 和牙底横截面积 (A_3) 一览表	194
8.3 承受偏心拉伸载荷的连接系统: 连杆和连杆盖之间的联接	145	附表 2 外螺纹零件 (粗牙和细牙 螺纹) 轴向拉伸试验中最 小屈服载荷	196 ~ 197
8.4 承受惯性力的连接系统: 安装 计算机	152	附表 3 材料的临界面压	198
8.5 承受一次性大冲击载荷的连接 系统: 安全带肩带固定器的 安装	156	附表 4 支承面积 A_w (最小值) 和 应力面积 A_s 比值表	199
8.6 电气功能件的连接系统: 车窗 玻璃电动升降器的安装	162	附表 5 支承面等效摩擦直径 d_w	200
8.7 暴露于高温下的连接系统: 排气歧管和排气管之间的 联接	166	附表 6 接触面的摩擦系数	201
第 9 章 为进一步理解螺纹紧固件 进行的计算练习	171	附表 7 不同材料的热膨胀系数 α 、 弹性模量 E 和剪切 模量 G	201
附录	185	附表 8 推荐的螺纹临界啮合 长度值	203
附录 A 附图	185	附表 9 从维氏硬度值获得的钢铁 材料 (光滑试样) 强度值 的估算	203
附图 1 ~ 6 六角头螺栓 (粗牙) 的 $T-F-\mu-\sigma_y$ 图	185 ~ 188	附录 C 符号列表	204
附图 7 ~ 12 六角法兰面螺栓 (细 牙) 的 $T-F-\mu-\sigma_y$ 图	188 ~ 191	参考文献	207

第 1 章

螺纹联接设计的基本过程

螺纹紧固件几乎在所有的机械设备上使用，因此，螺纹联接技术是确保机械系统可靠性的最重要技术之一。

由于频繁使用，螺纹紧固件已成为最标准化的零部件之一。在 ISO 和 JIS 之类的通用标准中已经提供了螺栓、螺母以及垫片等按其尺寸（公称直径、长度、头部形状等）和强度等级分类的零件目录表。因此，只需从标准中选择，任何规格的螺纹紧固件很容易使用。带来的结果是螺纹紧固件变成了一种非常简便的零件，通过“单纯的选择”就可以“设计”。

这里的问题是“根据什么进行选择”？在实际的设计中，螺栓和螺母的选择通常是基于直觉或感觉或与类似产品、相同技术条件的以往机型进行类比，以及仿照知名、深受欢迎的产品。因为螺栓的“设计”是在这样的基础上进行的，那么就不能判断出设计是否会导致失效的发生，即使没有导致失效的发生，也无法确认设计是否过强。所以这不是设计的方法，仅仅是单纯的选择。

螺纹联接设计简要描述如下：清楚地确定在机器的整个服役条件下，作用在螺纹紧固件上的各种应力；通过应用力学模式进行的各种分析，确定为避免导致失效，螺纹紧固件所必需的特性指标；从标准中选择满足要求的螺纹紧固件。

图 1.1 所示为螺纹联接设计的基本过程。首先，确定机器的使用条件和环境；其次，清楚地确定作用在部件上的各种应力；然后，考虑部件不失效的各种条件，完成力学计算；根据计算结果规定螺纹紧固件的技术要求；最后，从标准中选择满足上述要求的螺纹紧固件，这样不会增加紧固件类型的数目。

最重要和最基础的事情是明确确定作用在所设计零部件上的应力（载荷、温度和腐蚀介质等）。在实际情况下，有时设计并没有按这一程序进行。事实上，当涉及强度和可靠性的设计付诸实施时，如作用应力不明确确定，强度和可靠性设计二者所必需的信息是不明确的，所以不可能进行正确的设计。换句话说，在没有明确确定应力的情况下完成设计，意味着我们在没有充分研究的基础上进行强度计算就把事情确定下来了。在这种情况下，不可能做到“不会导致

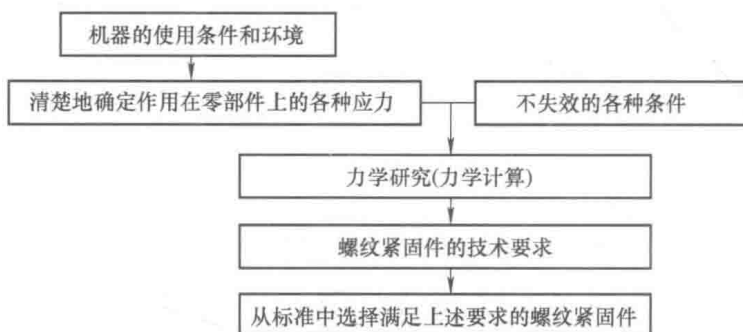


图 1.1 螺纹联接设计的基本过程

失效和导致多余功能的设计”。

其次，如果个别故障有可能发生，则必须确定技术要求，以防止所有此类故障的发生。也就是说，列出所有可能发生的故障，并且逐一检查，确定避免故障发生的技术要求。“在没有任何疏忽和遗漏的情况下进行分析研究”是重要的，这些分析研究往往就是力学计算。虽然大家都知道，应用力学分析是完成合理、充分设计的必要条件，但并不总是付诸实践。显然，这些分析研究是必须做的。

经过上述分析，与螺纹紧固件使用条件和环境相适应的要求将变得清晰。例如，这些要求有螺栓最小轴向预紧力、螺栓最低强度、螺栓最小尺寸、材料和螺纹紧固件尺寸等。

最后一步，从标准化零件中选择是更可取的方式，这样避免了螺栓种类的增加，而要取消已采用的部件是非常难的。螺栓种类的增加，增加了生产准备、生产、输送、储存和管理的负担，导致成本增高。从标准件中选择时，如果没有刚好合适的，重新设计会导致成本的增加。因此，设计人员必须考虑怎么做才是最好：引入一个新品种消除能力过剩，实现最佳设计；还是放弃最佳设计，采用标准件。这个问题必须客观地判断，考虑两种方案的优点和缺点，以及总成本。然而，也要注意这一事实：由于增加零件的种类而产生的负担往往被估计得小于实际值。

设计前必须确定技术要求，按照这些技术要求既不会出现故障，又不会要求过高。为了提出不出现故障的技术要求，首先必须知道螺纹联接中可能出现的所有问题，这些问题在下一章描述。

第 2 章

螺纹联接的故障现象

图 2.1 列出了螺纹联接的所有故障现象。图的左侧一栏是原始故障现象的名称；图的右侧一栏是由原始故障现象导致的次生问题。本章将根据这个图简释各种故障现象。

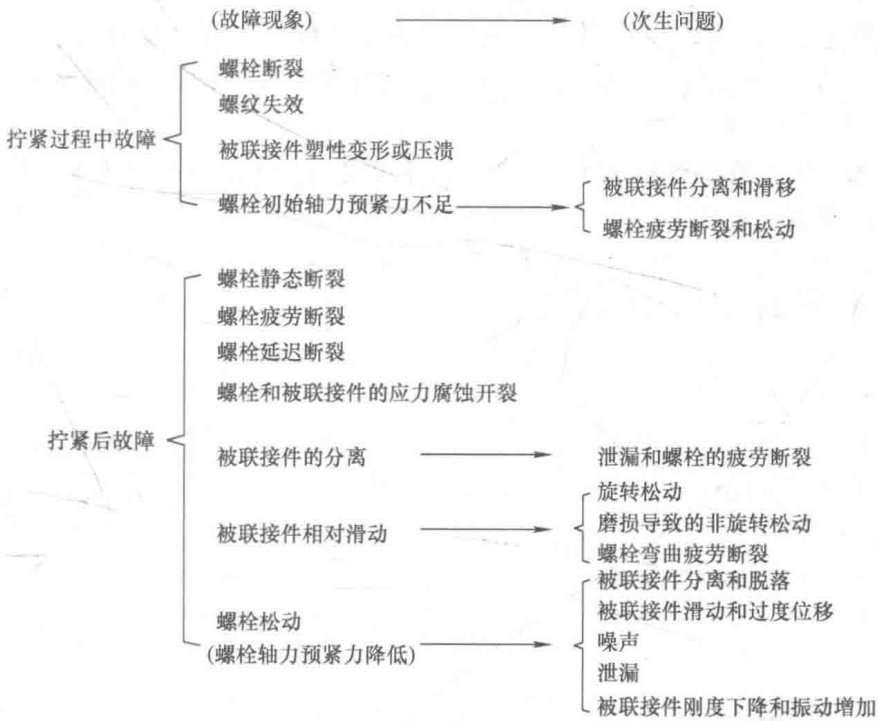


图 2.1 螺纹联接的故障现象

2.1 拧紧过程中的故障

(a) 拧紧过程中螺栓的断裂

这是在装配过程中拧紧螺栓时发生的螺栓破断。当轴向预紧力过大（也可

理解为紧固扭矩过大)或螺栓与螺母沾上油或润滑剂时(摩擦系数变小),这种现象容易发生。

(b) 拧紧过程中螺纹失效(螺纹剪切断裂)

在装配过程中拧紧螺栓时,螺栓或螺母在啮合长度范围内的所有齿牙从螺栓或螺母本体上剪掉或剥离,而不是以上描述的螺栓断裂。这称为螺纹失效或螺纹脱扣。当内螺纹材料为铝合金之类的较软材料时或螺栓和螺母的啮合长度相对较短时,这种现象容易发生。

(c) 被联接部件的塑性变形或压溃

这是在螺栓轴向预紧力作用下,被联接部件发生的塑性变形、塑性翘曲或压溃现象。当被联接部件的抗压强度相对较低、被联接部件的形状易于翘曲或螺栓的轴向预紧力太大时,这种现象容易发生。

(d) 螺栓初始轴向预紧力不足

这是由于螺栓拧紧过程中产生的螺栓初始轴向预紧力太小,且低于设定值时出现的现象。当轴向拧紧力(紧固扭矩)太小、螺栓和螺母相互咬合在一起或当螺栓和螺母应该涂油/润滑剂而未进行相应处理时(螺栓的摩擦系数相对较大),这种现象容易发生。

这是拧紧中最严重的问题,与没有拧紧的效果相同,将导致被联接件分离、螺栓疲劳断裂、被联接件产生相对滑移和螺栓松动等诸多问题。

2.2 拧紧过程后的故障

(a) 螺栓的静态断裂

这是有一个非正常大载荷作用在运转中的机器上时突然发生的损坏。当出乎意料的大载荷作用在机器上时,这种现象容易发生。例如在车辆偶然事故中就有可能发生这种现象。

(b) 螺栓的疲劳断裂

这种断裂在小于螺栓抗拉强度的载荷多次循环作用后发生。疲劳断裂不是上述在只有一次载荷循环下发生的断裂模式,而是在循环载荷作用下,多次疲劳损伤累积造成的损坏。当载荷大于一定极限值且重复多次时,这种现象容易发生。对于螺栓而言,经常发生的是拉伸疲劳断裂和弯曲疲劳断裂,这是非常严重的问题。

(c) 螺栓的延迟断裂(氢脆)

这是螺栓拧紧后,某个时间螺栓突然断裂的现象,甚至放置在陈列室中未经触碰或不受任何载荷的情况下都会发生。这是一种延迟断裂,在螺栓拧紧后的某个时间发生,通常在几个小时到数年之后。当螺栓具有超过 $1300\text{N}/\text{mm}^2$ 的非常

高抗拉强度时且装配载荷很大时,这种现象容易发生。

(d) 螺栓和被联接件的应力腐蚀开裂

这是一种和延迟断裂相似的现象,许多材料在拉伸应力和腐蚀性环境这两个条件下将会发生,甚至在被联接件没有任何外载的情况下也会发生。在高的拉伸应力和该材料所特有的腐蚀性环境这两个条件下,裂纹得以扩展。

(e) 被联接件的分离

这是一种由于作用在被联接件上的拉伸载荷大于螺栓的轴向预紧力时,导致的被联接件彼此分离的现象。

在外载作用下发生的被联接件的分离会导致泄漏和螺栓的疲劳断裂。在拉伸载荷的作用下,被联接件不应分离,在设计时考虑这点是非常重要的事情。

(f) 被联接件的相对滑动

当作用在被联接件上的切向载荷大于被联接件之间因螺栓预紧力产生的摩擦力时,被联接件之间产生相对滑动。

被联接件之间的滑动会导致快速旋转松动,如果相对滑动是反复多次,磨损导致非旋转松动和螺栓弯曲疲劳断裂,造成严重的后果,大大影响螺纹联接的可靠性。

因此,在切向载荷作用下被联接件不发生相对滑动,对设计而言是非常重要的事情。

(g) 螺栓的松动(螺栓轴向预紧力降低)

这是一种由于各种因素造成的紧固后螺栓轴向预紧力降低引发的现象,例如,这种松动可能是由被联接件反复相对滑动造成的、由被联接件的磨损造成的、由螺栓和被联接件的塑性变形造成的。

螺栓轴向预紧力是影响被联接件各种功能最重要和根本的因素(见第3章)。松动,即螺栓轴向预紧力的降低导致螺纹联接各种功能水平的下降,甚至完全丧失功能。因此,松动对螺栓零件可靠性有非常大、非常严重的影响。

松动分两种类型:快速旋转松动和慢速非旋转松动。

螺栓松动导致被联接件的分离和脱落、被联接件的滑动、被联接件滑动导致的被联接件过度相对位移和碰撞、由被联接件分离导致的噪声、联接刚度的降低、刚度降低而增加的振动,以及由于振动增强而导致的结构疲劳损坏、密封不良、螺栓的疲劳断裂等。

因此,松动是螺纹联接最严重的问题。

2.3 故障的特点和原因

如前所述,存在两种故障模式:螺栓拧紧过程中发生的问题和拧紧后使用过

程中发生的问题。在拧紧阶段出现故障的原因，除螺栓初始轴向预紧力过小之外就是螺栓轴向预紧力过大，而且这样的故障通常可以很容易在现场发现，以后很少发生。另一方面，螺栓装配后出现的螺栓初始轴向预紧力低以及其他各种故障，通常在使用期间由用户发现，此时机器已经售出，所以影响是非常严重的。为了防止这种故障，在螺栓设计和装配时必须小心谨慎地进行。

螺栓拧紧过程中出现故障的原因，要么是紧固扭矩太大，要么是太小，或者是采用扭矩（紧固）法装配时，紧固件的摩擦系数太小或太大。

螺栓拧紧后出现故障的原因，通常认为是在螺栓设计过程中考虑不周全或错误的估计造成的。

必须确定好螺纹紧固件的技术要求，以避免这类问题的发生。防止这类故障发生的原理和过程将在第3章讲述。

第 3 章

螺纹紧固件的基本原理

这一章是极其重要的，应该深刻理解。

3.1 螺纹紧固件的力学原理

3.1.1 斜面原理

如图 3.1 所示，有一个重物放置在与水平面呈 β 角的斜面上。为了沿斜面向上推动这个重物，如果假设斜面上没有摩擦，那么需要一个大于 $W\sin\beta$ 的力。如果角度 β 较小，则 $W\sin\beta$ 也就小；因此，一个在斜面上的较重物，只需一个很小的力就可以向上推动，这就是斜面原理。

顺便说一句，如图 3.2 所示，螺纹可以被定义为一个围绕圆柱的斜面并与斜面等效。反之，螺纹的展开就是一个斜面。

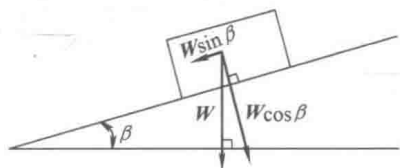


图 3.1 斜面原理（没有摩擦）

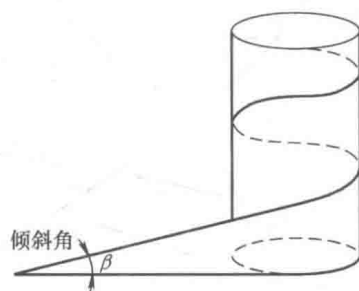


图 3.2 螺纹结构（围绕圆柱的斜面）

螺栓的拧紧过程就等于在斜面上推动重物，通过施加小的力 $W\sin\beta$ 就可以得到非常大的力 W （螺栓的轴向预紧力，假设斜面上没有摩擦）。但在现实中，由于斜面上存在着摩擦，推动 W 需要的力为 $W\sin\beta + \mu_s W\cos\beta$ ，这就是螺纹紧固的原理。