

HANDBOOK
OF SPACE
TRIBOLOGY



Handbook of Space Tribology

空间摩擦学手册

第三版

© AEA Technology Plc(2002)

EUROPEAN SPACE AGENCY

空间摩擦学手册

第三版

© AEA Technology Plc (2002)

EUROPEAN SPACE AGENCY

译者前言

中国科学院兰州化学物理研究所从事空间润滑材料与技术研究已有四十多年的历史。在兰化所润滑科技工作者的不懈努力下先后完成了东方红一号卫星短波天线机构防冷焊润滑，长征运载火箭超低温高速齿轮干膜润滑材料，风云卫星用系列润滑涂层与超低挥发液体润滑剂，神舟飞船固体润滑薄膜材料等二十多项空间润滑研究任务，为我国的航天事业发展了几十种润滑抗磨材料，并获得了十数项国家和院部级成果奖励。2005年固体润滑国家重点实验室在“空间润滑材料与技术”领域获得了国家自然科学基金委员会“创新研究群体科学基金”的支持，希望通过6~9年的努力揭示空间环境条件下材料磨损与润滑的机理，建立若干空间润滑材料设计制备的理论方法和技术规范，发展一系列满足超高真空、极端高低温、辐照、超高速或低速、重载、氧化还原介质等空间环境条件使用要求的润滑材料与技术，并出版我国的《空间摩擦学手册》。

近年来在开展空间润滑的研究过程中，有幸拜读了美国 NASA 的《Handbook of Space Tribology》和欧洲 ESA 的《Handbook of Space Tribology》，对我们的研究工作颇有启发，同时也使我们进一步认识到要出版自己的手册需要多年的研究积累。鉴于我国航天工业部门对这样一部手册的需求，在兰州化学物理研究所特种润滑防护材料研究发展中心副主任翁立军研究员的动议下，组织了我们的几位在读博士研究生对 ESA 的《Handbook of Space Tribology》进行了翻译，并由我对全文进行了校对和修改。由于本人知识水平的局限及时间方面的限制，译文中错误肯定很多，恳请大家在疑问之处对照原文予以更正。参加翻译的研究生包括方建、高飞、高晓明、郭志光、侯现明、梁军、李来军、裴小维、王李波、于波（女）、于波（男）、张霞。译文稿件由固体润滑国家重点实验室李小霞同志排版处理。

本译文仅仅作作为参考资料赠送相关协作单位，不作为正式出版物出版。译者理解译文中的所有知识产权属于 ESA 的 ESTL，请予以恰当使用，并请勿翻印。

我们有理由相信经过几年的努力，我国将会拥有自己的空间摩擦学手册。

中国科学院兰州化学物理研究所
固体润滑国家重点实验室
刘维民 研究员，室主任，所长
二零零六年十二月十六日

序 言

(第一版)

长期以来，人们一直渴望有一本关于空间摩擦学的参考手册。因此，空间摩擦学手册的首次出版发行是适时的，同时它也是 **ESTL**（欧洲空间摩擦学实验室）第 25 年工作成就的标志。手册主要（但不仅仅）是基于一些实践经验和由 **ESTL** 在这段时期内所获取的以及通过空间摩擦学课程所传播的诸多知识。

编写该手册的目的在于帮助设计者们和机械师们履行一些合理的摩擦学实践，帮助他们来决定如何最好地处理和使某一特定应用体系中的组件发生润滑；它也能对摩擦副的测试提供相关的指导，这些摩擦副可以是孤立体系也可以是母机械系统的一部分。

如果没有欧洲空间局的资金支持和指导，该手册的撰写是不可能的。因此，我们感谢欧洲空间局的支持，特别是该机构 **ESTEC** 的负责人(**Head of Mechanisms**) 迈克尔·艾顿 (**Michael Eiden**)，是他最初的想法酝酿出具有权威性的用于指导空间摩擦学的手册。

最后，应该注意的是我们打算定期地更新这本手册，更新可通过加入新产生的数据和对使用者们的建议作出反应的方式来完成，采用这种方式希望手册一直保持一种附加的、最新的相关信息，来满足从事机械装置的设计者们和机械师们的需要。

E. W. Roberts

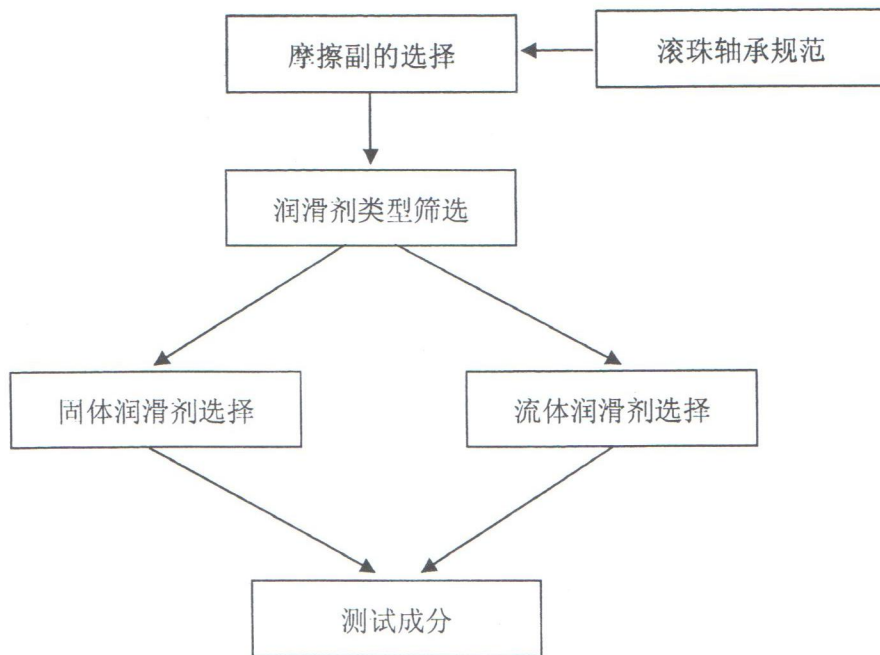
1997.12

怎样使用手册

该手册包含八章内容，下面列举了各章节的标题：

1. 基础摩擦学
2. 摩擦零件的选择、设计与性能
3. 润滑剂类型的选择
4. 固体润滑
5. 流体润滑
6. 摩擦副材料和表面
7. 组件和系统测试
8. 滚珠轴承规范

通过第一章来熟悉有关的基本概念；其余七章形成了手册的核心，内容涉及到从最初摩擦副的选择，到润滑油的筛选，最后到成分测试和机理测试；第八章说明了怎样草拟一份轴承采购规格表。下面给出了使用手册的流程图。



第六章详述了摩擦副材料的性质。当为了提高材料的性能而挑选底材或对材料进行表面修饰和处理（不是用润滑剂）时，可以查阅该章内容。

符 号

| | |
|------------------------|-----------------|
| A | 面积 |
| A_a | 表观接触面积 |
| A_r | 真实接触面积 |
| A_p | 投影接触面积 |
| A1 | 动力载荷容量方程活性因子 |
| A2 | 动力载荷容量方程材料因子 |
| A3 | 动力载荷容量方程润滑因子 |
| a | 圆形接触面积半径 |
| a_e | 接触椭圆旋转半轴 |
| B | 球轴承内径 |
| b | 曲径式汽封间隙 |
| b_l | 线接触半宽 |
| C | 蒸发方程常数 |
| C_e | 常数 |
| C₀ | 动力学载荷容量 |
| D_b | 外套圈直径 |
| D_r | 导杆直径 |
| d | 曲径式汽封直径 |
| d_a | 磨损容许深度 |
| d_h | 螺栓二次平均直径 |
| d_q | 轮廓斜率 |
| d_{th} | 螺帽二次平均直径 |
| d_w | 磨损深度 |
| E | 杨氏模量 |
| E' | 接触体诱导弹性模量 |
| F | 摩擦力或(曲径式汽封)导管传力 |
| F_e | 滚珠导轨滞后力 |
| F_g | 轴承/杆界面摩擦力 |
| F_i | 拉紧螺栓预载 |
| F_L | 可传递输出力 |
| F_{min} | 所需最小作用力 |
| F_r | 摩擦力不确定因子 |
| F_s | 滚珠导轨体系微片损失产生力 |
| F_p | 轴承预载 |
| F_w | 齿轮端面宽度 |
| g | 加速常数 |
| H | 维氏硬度 |
| H_a | 滞后不确定系数 |
| H_d | 粘合不确定系数 |
| H_y | 其它不确定系数 |

| | |
|-----------|-----------------|
| h | 油膜厚度 |
| h_a | 轴承副轴向位移 |
| h_m | 极压条件下油膜润滑 |
| h_{min} | 最小油膜厚度 |
| h_0 | 理想光滑表面(EHL)油膜厚度 |
| I | 惯量 |
| K | 磨损系数 |
| K_a | 粘着系数 |
| K_b | 螺栓转矩方程常数 |
| k | 磨损速率 |
| L | 滑动距离 |
| L_f | 轴承疲劳寿命(通过转数评价) |
| L_l | 线接触长度 |
| L_r | 径向负载 |
| l | 曲径式汽封长度 |
| l_q | 表面粗糙度 |
| l_b | 螺栓长度 |
| M | 分子量 |
| m | 质量 |
| n | 气体方程系数 |
| o_q | 轴承表面复合粗糙度 |
| P | 蒸汽压 |
| P_a | 表观接触加压 |
| P_d | 齿轮模数 |
| P_i | 曲径式汽封进口压力 |
| P_0 | 出口压力 |
| p | 曲径式汽封内压力 |
| p_m | 平均接触加压 |
| p_0 | 最大接触加压 |
| Q | 分子穿越汽封时流速 |
| R | 接触体曲率半径 |
| R' | 两接触体曲率等效半径 |
| R_a | 平均表面粗糙度 |
| R_g | 气体常数 |
| R_i | 轴承中心到内沟道中心的距离 |
| R_{kv} | 峰度 |
| R_q | 均方根粗糙度 |
| R_{sk} | 偏斜 |
| R_x | X 取向相对曲率半径 |
| R_y | Y 取向相对曲率半径 |
| R_z | 国标十点高度 |
| r | 球半径 |

| | |
|---------------|---------------------------|
| s | 剪切强度 |
| s_m | 轮廓峰间平均间距 |
| s_{root} | 齿轮齿根张应力 |
| T | 绝对温度 |
| T_l | 可输出扭矩 |
| T_{min} | 最小作用扭矩 |
| $T1$ | 卫星界面温度 |
| $T2$ | 从动载荷界面温度 |
| t | 时间 |
| t_l | 固体润滑膜厚度 |
| t_p | 最高峰下深度为 p 处表面长度 |
| U | 夹带速率 |
| V | 磨损体积 |
| v | 速率 |
| W | 法向接触载荷 |
| W_e | 起轴承作用等效载荷 |
| W_v | 蒸发速率 |
| W' | 线接触单位长度所受的载荷 |
| w | 球轴承最小外沟道宽 |
| Y | 屈服应力 |
| Y_g | 几何因子(用于计算齿轮齿弯曲应力) |
| α | 压-粘系数 |
| α_t | 螺纹断面角 |
| ΔH_v | 油蒸发潜热(vapourisation) |
| δ | 螺栓延长 |
| ϕ | 轴承接触角 |
| Φ | 轴承 PCD $\cos\theta$ 与球直径比 |
| η | 油粘度 |
| η_0 | 常温常压下动力粘度 |
| λ | 理论 EHL 膜厚与复合表面粗糙度比 |
| μ | 摩擦系数 |
| μ_{th} | 凹/凸型摩擦对偶摩擦系数 |
| μ_h | 凸/凹型摩擦对偶摩擦系数 |
| ν | 泊松比 |
| θ | 接触角 |
| σ_q | 两接触表面复合均方根粗糙度 |
| τ | 单层形成时间 |
| τ_0 | 接触表面最大剪切应力 |
| ψ | 塑性指数 |
| ω_{ir} | 内沟道角速度 |

目 录

| | |
|-----------------------|----|
| 第一章 基础摩擦学 | 1 |
| 1.1 表面和界面 | 1 |
| 1.1.1 工程表面 | 1 |
| 1.1.2 表面粗糙度的测量 | 1 |
| 1.2 接触表面 | 3 |
| 1.2.1 赫兹接触 | 3 |
| 1.2.2 屈服标准 | 5 |
| 1.2.3 赫兹接触应力分布 | 6 |
| 1.2.4 多重接触 | 7 |
| 1.2.5 表面粗糙度对赫兹理论影响 | 7 |
| 1.3 摩擦 | 8 |
| 1.3.1 摩擦系数 | 8 |
| 1.3.2 粘着摩擦 | 8 |
| 1.3.3 犁沟摩擦 | 8 |
| 1.3.4 非金属间摩擦 | 9 |
| 1.3.5 滚动摩擦 | 9 |
| 1.4 粘着和卡咬 | 9 |
| 1.4.1 粘着 | 9 |
| 1.4.2 卡咬 | 9 |
| 1.5 磨损 | 10 |
| 1.5.1 磨损机理 | 10 |
| 1.5.2 磨损理论 | 11 |
| 1.6 摩擦和磨损的测量 | 12 |
| 1.6.1 摩擦力测量技术 | 12 |
| 1.6.2 摩擦和磨损的测量和分类 | 13 |
| 1.6.3 测试环境 | 14 |
| 1.7 润滑 | 15 |
| 1.7.1 流体润滑 | 15 |
| 1.7.2 固体润滑 | 18 |
| 1.8 空间和航天器环境 | 20 |
| 1.8.1 航天发射环境 | 20 |
| 1.8.2 大气压力 | 21 |
| 1.8.3 辐射 | 22 |
| 1.8.4 温度 | 23 |
| 1.8.5 “零重力” | 24 |
| 1.8.6 引起机械性能衰退的环境因素指南 | 24 |

| | |
|-----------------------|----|
| 1.9 参考文献 | 24 |
| 第二章 摩擦零件的选择、设计与性能 | 26 |
| 2.1 旋转滚动轴承 | 26 |
| 2.1.1 旋转滚动轴承类型的选择 | 26 |
| 2.1.2 材料 | 33 |
| 2.1.3 精度/形状公差 | 33 |
| 2.1.4 预紧与负载能力 | 39 |
| 2.1.5 应用注意 | 43 |
| 2.1.6 保持架 | 43 |
| 2.1.7 防护 | 46 |
| 2.1.8 未对准 | 47 |
| 2.1.9 软件 | 48 |
| 2.1.10 应用 | 49 |
| 2.1.11 参考文献 | 49 |
| 2.2 平面、球面与端杆轴承 | 50 |
| 2.2.1 选择类型 | 50 |
| 2.2.2 衬垫材料的选择 | 50 |
| 2.3 滚球、滚柱及平面螺旋 | 51 |
| 2.3.1 类型的选择 | 51 |
| 2.3.2 球、轱子和平螺轩的类型 | 51 |
| 2.3.3 螺杆的润滑 | 52 |
| 2.3.4 预加负荷 | 53 |
| 2.3.5 不规范行为 | 53 |
| 2.3.6 应用 | 53 |
| 2.3.7 参考文献 | 54 |
| 2.4 线轴承 | 54 |
| 2.4.1 滑动、球形、滚动线性轴承的选择 | 54 |
| 2.4.2 材料 | 55 |
| 2.4.3 预加负荷 | 55 |
| 2.4.4 不规则的行为 | 55 |
| 2.4.5 球形轴承导向 | 56 |
| 2.4.6 球形滚动轴承操作 | 57 |
| 2.4.7 球形轴衬套 | 57 |
| 2.4.8 参考文献 | 58 |
| 2.5 齿轮 | 58 |
| 2.5.1 齿轮驱动的优缺点 | 58 |
| 2.5.2 选择类型 | 58 |
| 2.5.3 齿轮类型 | 59 |

| | | |
|------------|--------------------------|-----------|
| 2.5.4 | 材料 | 61 |
| 2.5.5 | 制造业 | 63 |
| 2.5.6 | 制造的精确度 | 64 |
| 2.5.7 | 承载能力 | 65 |
| 2.5.8 | 齿轮设计要点 | 65 |
| 2.5.9 | 齿轮的润滑 | 66 |
| 2.5.10 | 齿轮的磨损数据 | 67 |
| 2.5.11 | 应用注意事项 | 72 |
| 2.5.12 | 非正常行为 | 73 |
| 2.5.13 | 软件 | 73 |
| 2.5.14 | 应用实例 | 73 |
| 2.5.15 | 参考文献 | 74 |
| 2.6 | 滑动电接触装置 | 75 |
| 2.6.1 | 滑动环 | 75 |
| 2.6.2 | 滚动环 | 80 |
| 2.6.3 | 可分离式接线盒 | 80 |
| 2.6.4 | 电机电刷 | 81 |
| 2.7 | 其它摩擦元件 | 81 |
| 2.7.1 | 低粘着分离平面/表面 | 81 |
| 2.7.2 | 终点挡板 | 82 |
| 2.7.3 | 凸轮 | 83 |
| 2.7.4 | 螺纹紧固件 | 84 |
| 2.7.5 | 制动器 | 85 |
| 2.7.6 | 密封圈 | 86 |
| 2.7.7 | 参考文献 | 87 |
| 2.8 | 摩擦元件的安全系数 | 87 |
| 2.8.1 | 安全系数的确定 | 87 |
| 2.9 | 溶剂清洁处理 | 88 |
| 2.9.1 | 引言 | 88 |
| 2.9.2 | 太空机械零件元件中污染的来源 | 88 |
| 2.9.3 | 所选溶剂的性能 | 89 |
| 2.9.4 | 污染物在所选溶剂中的溶解度 | 90 |
| 2.9.5 | 颗粒清除所选用溶剂的作用 | 91 |
| 2.9.6 | 选择的溶剂在清洗分子水平表面时的效果 | 92 |
| 第三章 | 润滑剂类型的选择 | 95 |
| 3.1 | 选择指南：固体润滑与液体润滑的对比 | 95 |
| 3.1.1 | 固体润滑剂或液体润滑剂各自的应用领域 | 95 |
| 3.1.2 | 固体润滑剂或液体润滑剂都可以使用的情况下如何选择 | 95 |

| | |
|---|------------|
| 3.1.3 选择固体润剂的检查表单..... | 96 |
| 3.1.4 选择液体润滑剂的检查表单..... | 96 |
| 3.1.5 迷宫密封泄漏率计算..... | 97 |
| 3.2 增强润滑剂性能..... | 98 |
| 3.2.1 延长 PFPE 润滑油寿命..... | 98 |
| 3.2.2 延长固体润滑涂层寿命..... | 99 |
| 3.2.3 固体润滑部件的跑合..... | 99 |
| 第四章 固体润滑..... | 100 |
| 4.1 润滑剂的选择..... | 100 |
| 4.1.1 固体润滑剂在什么情况下使用..... | 100 |
| 4.1.2 固体润滑剂的优缺点..... | 100 |
| 4.1.3 固体润滑剂的类型..... | 100 |
| 4.2 固体润滑剂涂层..... | 102 |
| 4.2.1 涂层类型和应用方法..... | 102 |
| 4.2.2 固体润滑剂涂层的选择..... | 104 |
| 4.2.3 真空沉积的薄膜/涂层的摩擦学性能..... | 105 |
| 4.2.4 擦涂的 MoS ₂ 膜的摩擦学性能..... | 116 |
| 4.2.5 粘合涂层的摩擦学性能..... | 116 |
| 4.2.6 高温润滑涂层..... | 126 |
| 4.2.7 低温润滑涂层..... | 128 |
| 4.2.8 环境的影响..... | 129 |
| 4.2.9 用来防止静态动态粘着及防止疲劳磨损破坏的涂层..... | 132 |
| 4.2.10 固体润滑剂涂层的存储和操作..... | 138 |
| 4.3 固体润滑整体材料..... | 138 |
| 4.3.1 聚合物和聚合物复合材料..... | 138 |
| 4.3.2 非聚合物复合材料..... | 150 |
| 4.3.3 混合(复合)聚合物和无保持架轴承..... | 153 |
| 第五章 流体润滑..... | 156 |
| 5.1 流体润滑的选择..... | 156 |
| 5.1.1 何时使用流体润滑..... | 156 |
| 5.1.2 流润滑体的优点和缺点..... | 156 |
| 5.1.3 流体润滑类型..... | 157 |
| 5.1.4 流体润滑剂的性能..... | 159 |
| 5.1.5 PFPEs 的降解: 延迟发作..... | 160 |
| 5.1.6 添加剂..... | 161 |
| 5.2 流体润滑数据库..... | 161 |
| 5.2.1 介绍及解释术语..... | 161 |
| 5.2.2 名称、制造商和类型..... | 162 |

| | |
|---------------------------------|------------|
| 5.2.3 粘度、温度极限、分子量、表面张力和密度 | 165 |
| 5.2.4 蒸气压、VCM、比热和导热系数 | 168 |
| 5.2.5 Alpha 数据 | 169 |
| 5.2.6 注释 | 169 |
| 5.3 流体润滑剂的摩擦学性能 | 173 |
| 5.3.1 润滑方式 | 173 |
| 5.3.2 边界润滑 | 174 |
| 5.3.3 单向运动的滚球轴承 | 177 |
| 5.3.4 振动运动下的球轴承 | 207 |
| 5.3.5 齿轮 | 208 |
| 5.3.6 丝杆 | 209 |
| 5.3.7 环境的影响 | 210 |
| 5.4 流体润滑剂的损耗、保存和补给 | 210 |
| 5.4.1 爬行与迁移 | 210 |
| 5.4.2 保持架 | 215 |
| 5.5 操作、清洗和润滑程序 | 215 |
| 5.5.1 操作 | 216 |
| 5.5.2 存储 | 216 |
| 5.5.3 清洗 | 216 |
| 第六章 摩擦副材料和表面 | 217 |
| 6.1 材料性质 | 217 |
| 6.1.1 真空环境中材料的相容性 | 217 |
| 6.1.2 块体、摩擦副材料的性质 | 222 |
| 6.1.3 25 °C下材料性质的比较 | 224 |
| 6.2 表面工程 | 239 |
| 6.2.1 表面处理 | 239 |
| 6.2.2 摩擦组件的表面处理 | 241 |
| 6.3 摩擦组件的材料选择 | 245 |
| 第七章 组件和系统测试 | 248 |
| 7.1 简介 | 248 |
| 7.2 测试水平等级 | 248 |
| 7.3 测试环境 | 249 |
| 7.3.1 空气中测试 | 249 |
| 7.3.2 热真空测试 | 250 |
| 7.3.3 惰性气体环境 | 250 |
| 7.4 测试设备 | 251 |
| 7.4.1 检测室 | 251 |
| 7.4.2 测试装置列表 | 252 |

| | |
|---------------------------|-----|
| 7.5 组件测试指南..... | 253 |
| 7.5.1 球轴承..... | 253 |
| 7.5.2 线形轴承..... | 258 |
| 7.5.3 齿轮..... | 259 |
| 7.5.4 滚珠丝杆..... | 259 |
| 7.5.5 元件维护与保存..... | 260 |
| 7.6 机械装置测试指南..... | 261 |
| 7.6.1 测试目的..... | 261 |
| 7.6.2 测试的种类..... | 261 |
| 7.6.3 进行测试..... | 261 |
| 7.6.4 测试文件..... | 266 |
| 7.7 认证要求..... | 266 |
| 第八章 滚珠轴承规范..... | 268 |
| 8.1 介绍..... | 268 |
| 8.2 目标..... | 268 |
| 8.3 轴承规范文件获得的准备..... | 268 |
| 8.4 一般要求..... | 269 |
| 8.4.1 介绍部分..... | 269 |
| 8.4.2 术语..... | 269 |
| 8.4.3 责任..... | 269 |
| 8.4.4 质量保证..... | 269 |
| 8.4.5 材料检查、尺度检查及检查要求..... | 270 |
| 8.4.6 分隔与连续部分..... | 271 |
| 8.4.7 清洁、处理、包装、储存和转移..... | 271 |
| 8.4.8 可交付物..... | 274 |
| 8.5. 特定要求..... | 274 |
| 8.5.1 轴承类型..... | 274 |
| 8.5.2 要求的轴承数量..... | 275 |
| 8.5.3 轴承精度..... | 275 |
| 8.5.4 轴承材料..... | 275 |
| 8.5.5 轴承尺度..... | 276 |
| 8.5.6 负载能力..... | 277 |
| 8.5.7 构造..... | 277 |
| 8.5.8 预载..... | 278 |
| 8.5.9 质量..... | 278 |
| 8.5.10 轴承保持架..... | 278 |
| 8.5.11 转矩..... | 278 |
| 8.5.12 密封..... | 278 |

| | |
|----------------------------------|------------|
| 8.5.13 防护物 | 278 |
| 8.5.14 润滑 | 279 |
| 8.6. 参考文献 | 279 |
| 附录 1 一般要求 | 279 |
| 附录 2 精确要求 | 282 |
| 附录 3 空白获得方式 | 290 |
| 附录 4 规范例子 | 294 |
| 附录 5 CoC's | 295 |
| 附录 6 控制轴承精度的 AFBMA 标准列表 | 301 |
| 附录 7 控制轴承精度的 BS 和 ISO 标准列表 | 302 |
| 附录 8 附加说明 | 303 |