

高可靠抗疲劳平面涡卷弹簧关键技术的研究与应用

吴樟水

嵊州市人和弹簧机械有限公司 浙江 绍兴 312400

【摘要】：平面涡卷弹簧是高效储能弹性元件，通过卷曲与释放实现能量储存转化，在工业领域作用关键。其靠外界做功收紧储能，需时释放驱动机构等。本文聚焦其高可靠性与抗疲劳关键技术，阐述从材料选择强化（如碳钢特定处理）、精密制造工艺（弹簧机一体化自动成型技术），到关键工序（热处理等）的控制优化，分析技术协同作用及设计原理与关键计算，保障弹簧核心性能。结合其在多领域应用实例，论证技术突破对提升装备系统可靠性等的重要意义，并展望未来趋势。

【关键词】：平面涡卷弹簧；高可靠性；抗疲劳；关键技术；一次卷曲；热处理；力矩稳定性

DOI:10.12417/2705-0998.25.23.064

1 绪论

1.1 研究背景与意义

平面涡卷弹簧（发条弹簧）是核心机械元件，具有“储能-释能”特性，能将机械能转化为弹性应变能储存，在设定条件下释放做功。这一特性使其功能多样，可驱动周期性运动、提供恒定扭矩，或利用恢复力平衡重力，提高操作精度与安全性。

其应用场景广泛且深入，航空航天装备中用于收纳电缆等，确保线路整洁可靠伸缩；海洋工程装备里抵抗盐雾腐蚀，为探测设备提供收放动力；农业机械和汽车领域用于安全带、输油管等部件；医疗器械和精密检测仪器对其运动平稳性和寿命要求苛刻；园林机械、健身器材等也常见其身影。在野外、高空等特殊场合，它是被动“动力型功能元件”，工作可靠性关乎设备系统正常运作，失效可能导致严重安全事故。因此，对其可靠性、稳定性及疲劳寿命要求极高。开展相关关键技术研究，既有理论价值，也有提升高端装备制造业核心竞争力的现实意义。

1.2 本文主要研究内容

本文旨在围绕实现平面涡卷弹簧高可靠性与抗疲劳的核心目标，系统性梳理、分析其从材料到成品全流程中的关键技术环节。研究侧重工程实践层面的技术原理、工艺控制及对性能的影响机制，不涉及复杂数学模型推导。重点包括：

材料技术：探讨适用于高性能弹簧的碳钢等材料的特性，及通过合金化、纯净冶炼等提升性能途径。

精密成型与关键工序：剖析弹簧机实现从“切断”到“一次卷曲”的自动化连续生产，重点分析“一次卷曲”工艺的核心地位，并阐述热处理、上油、热定型等后续工序的关键作用。

性能保障技术：探讨如何通过工艺优化和质量控制，确保材料强度、输出力矩精确性与一致性、超长疲劳寿命等关键指标的实现。

应用与展望：总结关键技术在不同领域的成功应用，并展望未来技术发展趋势。

2 平面涡卷弹簧高可靠长寿命的关键技术体系

实现高可靠性与抗疲劳，是贯穿材料选择、结构设计、制造工艺、后处理及检验全过程的系统性工程。核心技术体系可概括为材料基础、精密成型、微观组织调控与性能稳定化处理三大支柱。

2.1 材料基础：高强度与高疲劳抗力的源泉

材料是弹簧功能的载体，其性能直接决定了弹簧的性能天花板。对于高可靠长寿命要求的平面涡卷弹簧，材料的选择与预处理是首要关键技术。

碳钢的核心地位与深化处理：碳钢因其优异的强度、弹性极限、疲劳强度及成熟工艺，成为主流材料。为满足极端工况，需对其进行“剖片”和“刮边”前置工艺。“剖片”即将钢材轧制成特定厚度与宽度的精密带材，其厚度均匀性直接影响卷绕均匀性和力矩输出稳定性。“刮边”是对带材边缘进行倒角或抛光，去除轧制形成的微裂纹、毛刺等应力集中源。在反复循环载荷下，任何微小边缘缺陷都可能成为疲劳裂纹起源，显著降低寿命。从设计计算角度，弹簧的疲劳寿命 N 常与交变应力幅 σ_a 密切相关，遵循如下的基本关系（源自修正的 Goodman 或 Gerber 准则）：
$$N = \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_a} \right)^m$$
，其中 σ_e 为材料的疲劳极限， m 为材料常数。刮边工艺通过消除缺口效应，有效降低了局部实际应力幅 σ_a ，从而显著提升计算疲劳寿命 N 。因此，高质量的刮边处理是提升疲劳寿命的基础性且关键的一步。

2.2 精密成型：弹簧机一体化自动成型与“一次卷曲”的作用

制造工艺的精度与一致性是保证弹簧性能重现性的关键。传统分散工序生产模式存在定位误差大、人为干预多、质量波动大等弊端。现代高性能弹簧制造普遍采用弹簧机进行自动化连续生产。

弹簧机的集成化革命：如工艺流程图（图1）所示，弹簧机的工作内容是将原工艺中的切断、退火、打钩、一次卷曲四个离散工序集成在一台设备上一次性自动完成。这种集成化带

来了革命性的优势：

切断：在机器上精确定位并切断带材，保证弹簧的初始几何尺寸。

退火（局部）：通常在卷绕前或过程中对特定区域（如打钩部位）局部加热软化，以降低硬度便于“打钩”成型，避免裂纹。

打钩：成型弹簧两端的钩状或异形结构，用于连接。其形状、尺寸和位置精度影响连接可靠性和力矩传递效率。

一次卷曲：这是整个成型过程的核心，也是决定弹簧初始应力分布、力矩特性和潜在寿命的最关键工序之一。

“一次卷曲”工艺的关键性：该工序是精确控制应力植入的过程。卷绕芯轴直径、速度、张力控制及导带机构轨迹精度，共同决定带材在卷紧状态下内部预置的应力场分布。理想的“一次卷曲”应使弹簧在自由状态下内部应力分布尽可能均匀，避免局部高应力区。若初始应力分布不均，在反复使用中高应力区将率先达到疲劳极限，导致早期失效。因此，“一次卷曲”是弹簧力矩输出能力和使用寿命的“奠基礼”，其工艺参数的优化与稳定控制是核心技术中的核心。从力学设计角度，平面涡卷弹簧的输出力矩 M 与其几何参数和材料特性直接相关，核心计算公式为： $M = \frac{Ebt^3}{12L}\phi$ ，其中 E 为材料弹性模量， b 为带材宽度， t 为厚度， L 为有效长度， ϕ 为转角（收紧圈数 $\times 2\pi$ ）。同时，卷绕过程中带材承受的最大弯曲应力 $\sigma_{max} = \frac{Et}{2R}$ （ R 为曲率半径）必须被精确控制，以确保低于材料的屈服强度并有充足的疲劳安全裕度。工艺优化的目标正是通过控制卷绕的芯轴直径（影响初始曲率半径 R ）、张力等，实现对 M 和 σ_{max} 的精准预置。

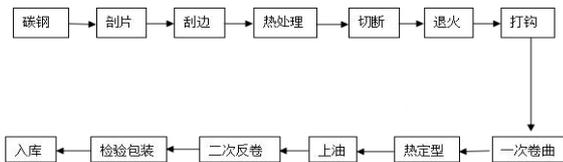


图 1

2.3 微观组织调控与性能稳定化处理：热处理、上油与热定型

弹簧初步成型后，微观组织不佳且内应力未充分释放，需后处理赋予其最终性能与稳定性。

热处理（淬火+回火）是提升材料强度的关键。淬火得高硬度、强度的马氏体组织，但脆性大、内应力高；回火降低脆性、消除内应力，使组织转变为强韧性良好的回火屈氏体或索氏体。精确控制加热温度等参数，可调控弹簧性能以满足设计要求，其质量决定弹簧“体质”基础。

上油是在表面涂防锈油或特殊润滑剂，能防锈蚀、形成润

滑膜，减少摩擦磨损与附加应力，延长寿命、保持力矩稳定。

热定型（应力松弛处理）是重要稳定化工艺，将弹簧在略高于工作温度下保持压缩（或卷紧）状态，使内应力释放和重新分布，处理后弹簧力矩衰减减小、输出稳定、尺寸稳定性提高。

二次反卷是对性能的最终“微调”与验证，反向卷绕可均化内部应力，使力-位移特性更贴近设计曲线，还能暴露潜在缺陷。

最终，经严格检验包装，合格产品交付使用。

2.4 设计原理与方案：力学计算与参数优化

弹簧的设计方案是连接功能需求与制造实现的桥梁，其核心在于通过力学计算与参数优化，在满足特定力矩输出、空间限制和寿命要求的前提下，确定弹簧的最佳几何参数与材料规格。

设计流程通常始于明确工况要求：所需力矩范围（ M ）、工作转角（ ϕ ）、安装空间（内径、外径、轴向宽度）及预期寿命（循环次数 N ）。基于此，结合材料特性（弹性模 E 、许用应力 $[\sigma]$ 、疲劳极限 σ_e ），运用核心公式进行初步设计。

(1) 几何参数确定力矩公式 $M = \frac{Ebt^3}{12L}\phi$ 是设计的起点。在 M 与 ϕ 已定的情况下，设计者需协调带材宽度 b 、厚度 t 与有效长度 L 。增大 t 可显著提升力矩，但也会增加卷绕应力；增加 b 可在一定程度上提高力矩而不剧烈增加应力，但受空间限制。通常通过迭代计算，在满足 $\sigma_{max} = \frac{Et}{2R_{min}} \leq [\sigma]$ 的强度约束下（ R_{min} 为最小卷绕半径），确定一组可行的 b 、 t 、 L 值。

(2) 疲劳寿命导向设计：高可靠性设计的关键在于疲劳寿命预测与保障。设计时需计算工作状态下的交变应力幅 σ_a ，并基于材料的疲劳极限 σ_e （通过实验获得），利用修正的古德曼图或相关疲劳公式 $N = (\sigma_e / \sigma_a)^m$ ，估算寿命 N 。设计方案的目的是通过参数选择与应力分析，将工作应力幅 σ_a 控制在足够低的水平，以确保 NN 远超设计要求。这通常意味着在空间允许下，优先选择较大的卷绕比（ D/d ， D 为弹簧圈直径， d 为芯轴直径）以降低弯曲应力。

(3) 应力分布优化设计：先进的方案不仅关注整体参数，更注重通过结构细节优化应力分布。例如，端部钩形结构的平滑过渡设计可避免应力集中；采用有限元分析（FEA）对“一次卷曲”后的初始应力场及工作应力场进行仿真，可以指导调整卷绕工艺参数（如张力梯度），从而在设计阶段预先优化，实现更均匀的应力分布，从根源上提升疲劳寿命。

3 关键技术对性能指标的贡献机制

平面涡卷弹簧的三个核心性能指标——材料强度、力矩特

性、使用寿命，均与上述关键技术紧密相关。

对材料强度的贡献：碳钢材质选择与预处理（刮边）奠定了高强度和高疲劳抗力的基础。热处理则是直接赋予材料高强度的决定性环节，通过相变强化实现了材料性能的飞跃。

对力矩特性的贡献：力矩的精确性与稳定性源于多环节的协同。“一次卷曲”决定了初始力矩和应力分布模式。热定型工艺则通过消除不稳定内应力，极大地减少了使用初期的力矩衰减，确保了长期力矩输出的稳定性。材料的均匀性（由剖片保证）也是力矩一致性的前提。

对使用寿命的贡献：长寿命是一个系统工程的结果。刮边消除了疲劳源。优化的“一次卷曲”创造了均匀的初始应力场，避免了早期破坏。热处理提供了强韧的微观组织以抵抗疲劳损伤。上油防止了腐蚀和磨损。其根本机制在于，这些工艺共同致力于降低弹簧工作时的最大交变应力幅 σ_a ，并提升材料的有效疲劳极限 σ_e ，从而通过前文所述的疲劳寿命计算公式

$$N = \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_a} \right)^m$$

，从理论上和实践上共同推高疲劳寿命 N 的数值。

而热定型则是提升长期抗松弛疲劳性能的关键，它使弹簧在亿万次循环中能保持稳定的性能，直至达到设计寿命。

4 关键技术的典型应用领域分析

高可靠长寿命平面涡卷弹簧的关键技术，使其在以下要求严苛的领域发挥了不可替代的作用：

航空航天领域：用于卫星太阳能帆板的展开机构、航天器内的线缆收纳系统。其高可靠性确保了在发射阶段的剧烈振动和太空极端温度环境下仍能万无一失地工作。

海洋工程与探测：应用于水下机器人（ROV/AUV）的缆绳收放系统、海洋浮标的信号线收纳。技术要求聚焦于耐腐蚀材料、特殊的表面处理（超越普通上油）以及对抗海水压力循环下的长寿命。

汽车工业：汽车安全带预紧器中的卷收器核心弹簧，要求在发生碰撞的瞬间极其可靠地动作，并具有极高的疲劳寿命以应对日常无数次的拉出与回卷。

高端医疗器械：如可移动的 X 光机、手术机器人机械臂中

的平衡弹簧。它们不仅要求寿命长、免维护，更对力矩的平稳性和静音运行有极高要求，这直接依赖于精密成型和优异的热定型技术。

工业自动化与精密仪器：在自动化生产线的往复运动模块、精密测量设备的回位机构中，这些弹簧提供了稳定、精确的复位力，保证了生产的节拍和测量的精度。

5 结论与展望

本文系统论述了实现高可靠长寿命平面涡卷弹簧所涉及的关键技术体系。研究表明：

弹簧的高性能是一个从材料源头到最终处理的全链条控制结果。碳钢的优质选材与精密预处理（如刮边）是保证长寿命的基础。

弹簧机一体化自动成型技术，具备一次性成型的显著优势。凭借这一特性，它能够大幅缩短生产周期，显著提升生产效率。同时，在生产过程中受人为因素影响小，可有效保证产品的一致性。此外，该设备占用生产车间的空间较小，能有效节省场地资源，并且其运行安全可靠，为生产过程提供了有力保障。特别是其中“一次卷曲”工序的精确控制，是奠定弹簧优良初始力学性能，尤其是力矩特性和潜在寿命的关键。

热处理与热定型等后处理工艺是调控弹簧微观组织、稳定其力学性能、最大化其使用寿命的核心手段。它们与精密成型工艺相辅相成，共同构成了高性能弹簧制造的技术支柱。

展望未来，平面涡卷弹簧技术的发展将呈现以下趋势：一是材料多元化，开发和应用更高比强度、更优耐腐蚀性的新材料，如特种不锈钢、钛合金乃至非晶合金等。二是工艺智能化与数字化，利用传感器、大数据和人工智能技术，对“一次卷曲”、热处理等关键工序的参数进行实时监控、自适应调整与优化，实现制造过程的精准预测与控制。三是设计精细化与计算驱动化，结合有限元分析（FEA）和基于前述力学公式的疲劳寿命预测软件，进行弹簧结构的拓扑优化和应力场仿真，在设计阶段实现应力分布最优化，从而系统性地提升可靠性和寿命。通过持续的技术创新，平面涡卷弹簧必将在更广阔的领域支撑起现代装备制造业向着更高、更可靠、更耐久的境界迈进。

参考文献：

- [1] 赵猛.张力补偿装置用涡卷弹簧的研究分析[D].江苏:扬州大学,2013.
- [2] 陈明武.平面涡卷弹簧热处理工艺革新[J].山东工业技术,2015(18):4.
- [3] 梁东升,曾鹏飞,刘双杰,等.非接触型平面涡卷弹簧的研究[J].成组技术与生产现代化,2018,35(3):28-32.
- [4] 赵孝谦.平面涡卷弹簧性能分析与优化设计[D].辽宁:大连海事大学,2017.