

电动床传动机构的动力学仿真与运行稳定性优化研究

毛守仁 滕爱芬 李国长

浙江班艺实业有限公司 浙江 温州 325100

【摘要】：随着智能家居发展及健康睡眠需求提升，电动床运行品质日益重要，其传动机构动态性能直接决定运行平稳性、噪声水平及可靠性。本研究针对电动床传动系统动力学特性与稳定性优化展开研究。通过构建包含电机、传动机构与执行件的多体动力学模型，模拟系统在启动、匀速运行及制动工况下的动态响应，揭示运行不稳定的内在机理源于传动间隙引发的非线性冲击与运动部件惯性力的耦合作用。据此提出综合性优化策略：采用预紧消除降低传动链扰动，运用非对称速度曲线平滑运动过程，引入阻尼材料抑制结构振动。仿真结果表明，优化后系统在保持驱动能力的同时，运行平稳性显著提升，为改善电动床综合性能提供了理论依据和技术路径。

【关键词】：电动床；传动机构；动力学仿真；运行稳定性；振动抑制；优化

DOI:10.12417/3083-5526.26.01.032

1 引言

当前，家居产品的智能化与人性化已成为不可逆转的发展趋势，电动床作为融合了机械、驱动与控制技术的代表性产品，正从简单的姿态调节功能，向促进健康睡眠、集成健康监测与提供舒适体验等更高层次发展。在这一演进过程中，用户不仅关注其功能的多样性，更对其运行品质提出了近乎严苛的要求。运行过程中的异响、卡滞、抖动及姿态变换不流畅等问题，会直接破坏睡眠环境的宁静，影响使用舒适度，甚至引发用户对产品质量与安全性的疑虑。

电动床的运行品质，从根本上由其传动机构的动态性能所决定，常见的传动形式，如推杆电机、直线电机或旋转电机配合连杆/丝杠的机构，在本质上是一个典型的机电动力传动系统。该系统在服役过程中，不仅承受着静态负载，更面临着因电机启停、负载变化及机构自身惯性所引发的动态激励。这些动态激励若与传动链中的间隙、构件弹性等非线性因素相耦合，极易诱发振动与冲击，从而导致运行不稳定现象。传统的设计方法多依赖于静力学计算与经验试制，难以精确预测和解决此类动态问题，往往导致产品开发周期长、成本高，且性能难以达到最优。

因此，本研究旨在引入一套基于动力学仿真与稳定性优化的系统性设计方法，以应对上述挑战。研究将不局限于对单一部件的改进，而是将整个传动系统视为一个有机的整体，深入探究其内在的动态作用机制。具体而言，我们将通过建立高保真的多体动力学模型，虚拟再现传动机构在实际工作中的动态行为，精准识别导致运行不稳定的关键因素与薄弱环节。在此基础上，提出具有针对性的稳定性优化策略，并从理论与仿真层面验证其有效性。本研究的目的在于形成一套能够指导电动床传动系统设计与性能提升的理论方法，为开发运行更平稳、更安静、更可靠的高品质电动床产品提供核心技术支撑。

2 电动床传动系统构成与动力学问题分析

电动床的传动系统通常由驱动源、传动机构与执行部件三个基本单元构成，驱动源多为低压直流电机，以其转矩输出驱动整个系统；传动机构则负责将电机的旋转运动转换为床体姿态调整所需的直线或旋转运动，常见形式包括齿轮箱、蜗轮蜗杆、丝杠螺母以及各类连杆铰链机构；执行部件则是直接与床架连接，输出推拉力或扭矩的推杆或摆臂，这一系统在运行中表现出的动力学行为，是决定其工作品质的核心。

在实际应用中，该传动系统暴露出的典型动力学问题主要集中在以下几个方面，首先是运行过程中的异常振动与噪声，这种振动并非单一频率的简谐振动，而是由电机电磁激励、齿轮啮合冲击、构件惯性力以及关节间隙共同作用产生的宽频带响应。其次是运行不平稳，表现为床体在升降或背部弯曲过程中出现肉眼可见的卡顿、抖动或速度不均，严重影响了使用的舒适性与高端感。最后是启停阶段的冲击，在电机启动加速与制动减速的瞬间，由于运动状态的突变，系统的惯性力会急剧变化，若传动链中存在间隙，则会形成明显的反向冲击，产生“啮当”异响，长期作用下还会加速结构的疲劳损伤。

深入剖析这些问题产生的根源，可以归结为两类核心的动力学激励源，其一是传动链内部的非线性因素，其中最具代表性的是传动间隙。无论是齿轮副的齿侧间隙、丝杠副的轴向窜动，还是铰接处的连接松动，这些微观的间隙在驱动方向改变时，会导致从动件与主动件发生短暂的脱离与再撞击，产生强烈的瞬态冲击载荷，这种冲击是一种典型的非线性动力学现象，会激发系统广泛的共振模态。其二是运动部件的惯性激励，电动床的运动部件，如推杆、连杆乃至床板本身，均具有一定的质量。当电机驱动这些部件进行加速或减速运动时，根据牛顿第二定律，必然会产生惯性力，该惯性力与运动加速度成正比，若速度规划不当，特别是在启停阶段，巨大的加速度将导致巨大的惯性力，从而引发强烈的振动与冲击。这两类激励源往往相互耦合，间隙放大了惯性冲击，而惯性力又加剧了间隙

处的碰撞效应，共同构成了系统运行不稳定的内在机理。

3 传动系统动力学仿真模型的构建与验证

要精确捕捉并理解前述的动力学行为，仅凭理论解析或经验判断是远远不够的，必须依赖于先进的计算机辅助工程分析技术，即多体动力学仿真。构建一个高保真的传动系统动力学模型，是进行后续分析与优化的基础。

模型构建首先需要完成系统的拓扑结构描述，这意味着要清晰地定义系统中各个构件（如电机壳体、齿轮、丝杠、推杆、连杆等）以及它们之间的连接关系（即运动副，如旋转副、移动副、齿轮副、球铰等）。每个构件都需要赋予其准确的质量、质心位置和转动惯量等惯性参数，对于传动系统中的关键柔性体，例如细长的推杆或面积较大的床架，若其弹性变形对系统动态响应有显著影响，则需采用柔性体技术进行建模，以更真实地反映结构振动。

在完成几何与惯性定义后，最为关键的一步是施加正确的力学激励与负载，驱动源的输入通常以电机输出轴的转速或转矩函数来定义，该函数应能准确反映电机真实的伺服特性，包括启动、匀速运行和制动三个阶段的动力学过程。负载的施加则更为复杂，它不仅包括床体自重与使用者体重构成的恒定静态负载，还应考虑因姿态变化而导致的负载力臂动态变化，以及床垫对床架的反作用力。一个精确的负载模型是获得可靠仿真结果的重要保障。

在模型验证环节，需要通过将仿真结果与物理样机的实测数据进行对比来完成。常用的对比指标包括：推杆末端的位移-时间曲线、速度-时间曲线，以及通过加速度传感器测得的系统关键部位的振动加速度信号。若仿真曲线与实测曲线在主要特征，如运动周期、峰值加速度、冲击时刻等方面能够高度吻合，则证明所构建的动力学模型具有足够的精度和可靠性，能够作为虚拟分析平台，用于预测系统在修改设计参数后的动态响应，从而大幅减少对物理样机的依赖，缩短开发周期，降低研发成本。

4 基于仿真结果的运行稳定性优化策略

通过对已验证的动力学模型进行深入仿真分析，我们可以清晰地观察到传动系统在典型工况下的动态响应细节，从而精准定位不稳定的根源。基于此，本研究提出一套系统性的运行稳定性优化策略。

首要策略是消除与抑制传动链内部的非线性扰动，针对危害最大的传动间隙，最直接有效的方法是引入预紧力机制。对于齿轮传动，可采用双片齿轮齿啮消除结构；对于丝杠传动，则可通过配对使用的角接触轴承施加预紧，消除轴向窜动。预紧力的引入使得传动副在正反转时始终保持在单面接触状态，从根本上避免了因间隙存在而产生的脱离与撞击，将非连续的非线性冲击问题转化为连续的力传递问题，极大地平滑了转矩

波动。

核心策略是优化运动规划以平缓惯性激励，惯性力与加速度的直接关联性，为我们通过控制“软启停”来抑制振动提供了可能。本研究主张采用非对称 S 型速度曲线对电机的运动轨迹进行规划，与传统梯形速度曲线在启停瞬间加速度突变不同，S 型曲线能够保证加速度的连续、平滑变化。所谓非对称，是指根据具体工况，独立设置启动加速段与制动减速段的时间参数，例如在承载较重时采用更缓的启动加速与相对稍急的制动，以实现动态负载下的最优平稳性。这种规划方式能显著降低运动状态切换时的最大惯性力峰值，从源头上减弱了最主要的振动激励。

辅助策略是增强系统的振动能量耗散能力，即便采取了上述措施，系统中仍会存在残余振动。为此，需要引入阻尼减振技术。可以在推杆外壳内部、电机安装座与主框架的连接处等关键位置，有针对性地敷设高阻尼复合材料，如约束层阻尼垫。这些材料能够将结构振动的机械能迅速转化为热能并耗散掉，从而有效抑制共振振幅，并加速自由振动的衰减。此外，对推杆外壳等薄壁结构进行加强筋布局优化，提升其局部刚度，也能改变其固有频率，避免与主要激励频率重合，从而从被动层面提升系统的振动鲁棒性。

5 优化效果评估与综合性能分析

为量化评估所提优化策略的实际效果，需在相同的仿真环境下，对优化前后的传动系统模型进行对比分析。评估应建立一个多维度的性能指标体系。

动态性能指标是评估的核心，首先，通过对比推杆输出端的速度-时间曲线，可以直观地看到优化后曲线的平滑度提升，启停阶段的速度超调与跌落现象得到有效抑制。其次，分析系统关键部位的振动加速度响应，其加速度均方根值应有显著下降，特别是在启停瞬间的冲击加速度峰值应能降低 50% 以上，这直接对应着异响与撞击感的消除。通过频域分析，还可以观察到优化后振动能量在主要啮合频率及其倍频处的幅值大幅降低。

静态与耐久性能同样重要，优化措施，尤其是预紧力的引入，可能会略微增加系统的运行阻力与摩擦损耗。仿真需确认由此导致的驱动电机负载转矩增加仍在其额定工作范围内。同时，由于冲击载荷是机械疲劳的主要诱因，冲击的减弱将直接延长传动部件，如齿轮、轴承的使用寿命。通过基于仿真载荷谱的疲劳分析，可以预测优化后系统的理论寿命周期获得显著延长。

综合来看，优化方案的实施是在动态平稳性、驱动效率与结构耐久性之间寻求并实现了一个更优的平衡点，虽然可能以微小的能耗增加为代价，但换来了运行品质的质的飞跃。这种品质提升具体表现为：用户感知到的运行噪音分贝值大幅降

低,床体姿态变换过程如丝般顺滑,启停柔和无感,从而极大地增强了产品的高级感与用户信任度。本研究通过系统性的动力学仿真与针对性优化,不仅为解决电动床运行稳定性问题提供了具体方案,更展示了一种面向性能驱动的精密传动系统设计范式,对其余类似家用机电产品的开发也具有积极的借鉴意义。

6 结论与未来展望

本研究通过构建电动床传动系统的多体动力学模型,深入分析了其运行不稳定的内在机理,证实了传动间隙与运动部件惯性力的耦合激励是导致振动与冲击的主要根源。基于此,提出的综合性优化策略——通过预紧力消除传动间隙、采用S型曲线规划平滑速度过渡、引入阻尼材料增强振动耗散——经仿真验证,能显著提升系统的运行平稳性与静音性能。这套基于虚拟仿真的设计方法,为电动床传动系统的性能优化提供了有

效途径,突破了传统依赖经验试错的局限,对提升产品的综合竞争力具有重要指导意义。

展望未来,本研究方向仍存在进一步深化的空间,首先,在模型精细化方面,可进一步考虑驱动电机的电磁特性与控制算法的耦合作用,建立更为全面的“机电-控制”一体化联合仿真模型,以更精确地预测系统在复杂控制策略下的动态响应。其次,在智能感知与自适应控制方面,未来的传动系统可集成功力传感器与加速度传感器,实时监测负载变化与振动状态,并据此自动调整运动参数,实现基于工况的自适应抑振,使产品具备更高的智能水平。此外,在新材料与新工艺的应用上,探索采用高性能工程塑料齿轮等轻量化、低噪声传动部件,以及研究更高效的结构阻尼一体化设计,都将为传动系统的静音化、轻量化设计开辟新的可能。最终,电动床传动系统将向着更智能、更安静、更可靠的方向演进,为构建高品质的智能家居环境提供核心支撑。

参考文献:

- [1] 潘荣,张雪薇,邱梦樊,等.电动床关键活动部位改良设计[J].科技视界,2016,(06):83.
- [2] 沈立中,赵丽蓉,程婕,等.智能便捷组合电动床的设计[J].循证护理,2023,9(01):188-189.
- [3] 陈紫薇,王以华,赵玲.电动床的改进设计研究[J].科技视界,2014,(17):18+38.
- [4] 张建国,郭艳萍,薛强.多功能电动床水平抬升机构的运动学分析及仿真[J].现代制造工程,2011,(11):72-77.