

基于 RecurDyn 的极地冰下基岩取心钻具反扭装置的运动仿真及运动分析

于成凤^{1,2}, 郑洽川^{1,2}, Pavel Talalay^{1,2}, 曹品鲁^{1,2}, 范晓鹏^{1,2}, 张云龙¹

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 吉林大学极地研究中心, 吉林 长春 130026)

摘要:在极地钻探技术领域, 铠装电缆式电动机械取心钻具应用广泛, 优化、设计可靠的反扭装置, 提高其反扭力矩, 是冰下基岩电动机械取心钻具钻进成功的关键所在。为了分析反扭装置的全部性能, 提出了基于数字化虚拟样机 RecurDyn 的仿真方法。反扭装置的组成机构是平面六杆机构, 在 RecurDyn 中导入由 inventor 软件建立的反扭装置几何模型进行运动仿真及分析。介绍了利用 RecurDyn 软件来实现平面六杆机构(反扭装置)运动仿真及分析的方法和步骤。以反扭装置作为研究对象, 在 RecurDyn/post 模块中, 用动画来表现反扭装置的运动过程, 用图表来反映运动仿真的结果。仿真的结果证明反扭装置设计的科学性、合理性以及实用性, 可以实现预定位置变化, 满足极地钻探中平衡钻进的要求。

关键词:极地钻探; RecurDyn; 反扭装置; 取心钻具; 运动分析

中图分类号: P634.4 文献标识码: A 文章编号: 1672-7428(2013)12-0021-04

Motion Simulation of Anti-torque Device Based on RecurDyn for Coring Tool Used for Sub-glacial Bedrock in Polar Regions and the Motion Analysis/YU Cheng-feng^{1,2}, ZHENG Zhi-chuan^{1,2}, Pavel Talalay^{1,2}, CAO Pin-lu^{1,2}, FAN Xiao-peng^{1,2}, ZHANG Yun-long¹ (1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2. Polar Research Center, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China)

Abstract: In the field of drilling technology in the polar regions, the coring tools of armored cable type electric machinery are widely used. Optimizing and designing the anti-torque system to improve the anti-torsion is the key for the successful core drilling in sub-glacial bedrock with electric machinery coring tool. In order to analyze all the performance of anti-torque device, the simulation method based on digital virtual prototype RecurDyn is proposed. Anti-torque device is composed of planar six-bar mechanism; the inventor software is introduced into RecurDyn to establish the geometry model of anti-torque device, by which the motion simulation and analysis are carried out. The paper introduces the method and procedures of how to use the RecurDyn software to realize the motion simulation and the analysis on the planar six-bar mechanism (anti-torque device). With anti-torque device as the research object, the motion of anti-torque device is showed by animation in RecurDyn/post module and the chart is used to reflect the result of motion simulation, by which the science, the rationality and the practicability of anti-torque device design are proved and the predetermined position changing can be determined to satisfy the request of balance drilling in polar regions.

Key words: polar drilling; RecurDyn; anti-torque device; coring tool; motion analysis

0 引言

南极冰盖钻进始于 20 世纪中期, 尽管早期的回转机器钻进可以获得可以接受的钻速, 但钻进设备比较笨重。由于地理位置偏僻、运输和能量供应等问题, 笨重的商业钻机并不适用于南极大陆钻进。20 世纪 90 年代, 俄罗斯和美国相继开发了无钻杆式, 利用铠装电缆和绞车进行钻具提升和下放作业的特殊钻探技术, 即铠装电缆式电动机械取心钻进

技术。与传统钻进作业相比, 这种技术可以减少材料和能源消耗 3~4 倍, 取得了良好的效果, 目前得到了普遍应用。

尽管许多国家曾经尝试采用铠装电缆电动机械取心钻具钻取冰下基岩, 但均未取得良好的效果, 目前国际上仅美国在南极边缘获得 10 cm 冰下基岩样品。从工程实践看, 采用铠装电缆式电动机械取心钻具钻进冰下基岩尚存在诸多问题需要解决。设计

收稿日期: 2013-11-13; 修回日期: 2013-12-03

基金项目: 中国地质调查局地质大调查项目“地质勘查钻探技术综合研究与应用示范”之“极地冰下基岩取心钻具反扭系统研究”(1212011220280)、“南极冰下基岩电动机械取心钻具的研制”(12120113016900)

作者简介: 于成凤(1988-), 男(汉族), 山东临沂人, 吉林大学硕士研究生在读, 地质工程专业, 从事岩土钻凿工艺及机具的研究工作, 吉林省长春市西民主大街 938 号, yzc8802@163.com; 郑洽川(1965-), 男(满族), 吉林长春人, 吉林大学建设工程学院副教授, 探矿工程专业, 从事岩土钻凿工艺与机具研究及教学工作, zhengzc@jlu.edu.cn。

可靠的反扭装置是基岩取心钻进成功的关键。

现有电动机械取心钻具反扭系统一般由 3~4 个刀翼组成,钻进时依靠刀翼支撑在孔壁上实现反扭^[1]。与冰层取心钻进相比,由于岩石的硬度和研磨性远大于冰,冰下基岩钻进时能量消耗高、扭矩大,常规反扭系统无法平衡钻进时产生的扭矩。一旦反扭系统失效,不但无法保证有效钻进,而且有可能导致铠装电缆随钻具回转而扭结甚至断裂。优化、设计反扭装置,提高其反扭力矩,是冰下基岩电动机械取心钻具钻进成功的关键所在。

在工程实际中设计和使用着各种各样的机构,传统的设计方法只能将机构在平面图纸上描绘出来,而不能展示出它的实际运动情况和运动过程^[2]。本文以机械系统分析软件为平台,探讨反扭装置的运动仿真和运动分析情况,通过用计算机模拟上述过程,即作 3D 造型、装配后,通过定义所有运动件、运动副以及各种机构运动数据等,使机构如试机般真实自然地运动起来,从而在运动分析方面容易得到较真实机构试运行更精确、具体、甚至真实机构无法得到的数据,对反扭装置的优化,设计提供更准确的方法。RecurDyn 多体系统优化仿真技术可以实现机构的运动仿真及运动分析,因此下面用 RecurDyn 分析软件对反扭装置进行运动仿真和运动分析。

1 RecurDyn 软件的工作原理和分析方法

1.1 RecurDyn 软件工作原理

新一代的系统级多体动力学分析软件虚拟产品设计开发工 RecurDyn(Recursive Dynamic)是由韩国 FunctionBay 公司基于其划时代算法——递归算法开发出的新一代多体系统动力学仿真软件。基于此,韩国 FunctionBay 公司充分利用最新的多体动力学理论,基于相对坐标系建模和递归求解,开发出 RecurDyn 软件。该软件具有令人震撼的求解速度与稳定性,成功地解决了机构接触碰撞中上述问题,极大地拓展了多体动力学软件的应用范围。鉴于 RecurDyn 的强大求解功能,软件广泛应用于航空、

航天、军事车辆、军事装备、工程机械、电器设备、铁道、船舶机械及其他通用机械等行业^[3]。

在 RecurDyn 软件中作运动仿真和运动分析,通常用到图 1 所示 5 个模块。即先在 modeling 模块中建立机构,包括构件、运动副、源运动定义;然后通过 analysis 计算求解;再仿真,动态显示机构运动情况,最后从 graph 输出各种分析线图及数据文件。其间出现任何问题或不理想情况均可返回 modeling 修改,直至满意^[4]。

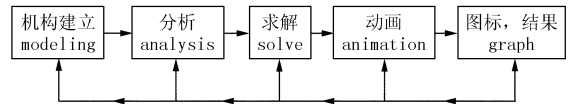


图 1 仿真过程

1.2 RecurDyn 软件的分析方法

1.2.1 反扭装置工作原理

对于如图 2 所示的平面六杆机构,即反扭装置的机械原理图。其设计过程如图 1 所述。图 3 所示的是反扭装置剖面图。该反扭装置是由 3 个相同的六杆机构均布组成。每个平面六杆机构所起的作用相同,故只分析其中一个即可。平面六杆机构是由滑刀下支座、滑刀中支座、滑刀上支座、弹簧座、弹簧导杆、连杆、滑刀、调整拉杆、弹簧和调整螺母组成,其中滑刀通过连杆一、连杆二和连杆三分别与滑刀上支座、滑刀中支座和滑刀下支座相铰接,滑刀中支座和滑刀下支座固结在固定架上。调整拉杆下部轴段与滑刀下支座、滑刀中支座上设置的中心孔滑动配合、调整拉杆上部轴段与弹簧座上设置的中心孔滑动配合,弹簧置于滑刀上支座与弹簧座之间,弹簧导杆分别插设在滑刀上支座和弹簧座上设置的孔内,通过弹簧导杆确定弹簧的位置,调整拉杆上部轴段与下部轴段之间的轴肩与滑刀上支座底部端面接触,调整拉杆的顶端有螺接调整螺母,通过调整

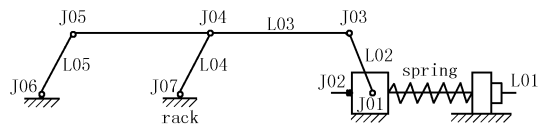


图 2 反扭装置的平面六杆机构示意图

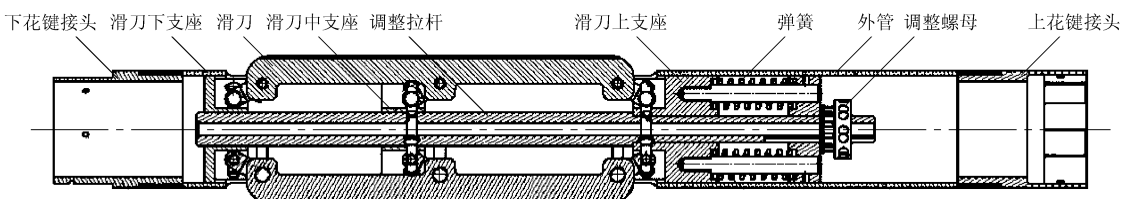


图 3 反扭装置剖面图

螺母的转动能够带动调整拉杆、滑刀上支座沿轴向移动,同时牵拉第三连杆带动滑刀平移。图 4 为反扭装置的实物图。



图 4 反扭装置实物图

1.2.2 RecurDyn 的反扭装置模型导入

RecurDyn 自身带有简单的几何模型工具,用于建立一般的圆柱体、长方体、球、连杆以及输送带、链齿轮等。但对于实际应用中碰到的复杂的集合体,就需要在专门的几何建模软件上先建立集合体,以有利于尺寸的定位,得到尺寸精度比较高的集合体,同时也提高了几何体在 RecurDyn 中虚拟仿真的精确度^[5]。本文利用 inventor2014 建立反扭装置的各个零部件,装配后另存为 stp 格式文件,最后导入 RecurDyn 中,为几何模型添加属性、约束和运动。建模后导入图如图 5 所示。



图 5 滑刀向外扩张前仿真动画图

1.2.3 创建反扭装置运动分析方案

进入 RecurDyn/Professional 模块,新建运动分析方案。为此方案创建 5 个连杆(links)和 7 个运动副(joints)。如图 2 所示,5 个连杆分别是 L01、L02、L03、L04、L05;7 个运动副分别是转动副 J01、J03、J04、J05、J06、J07 和平动副 J02。其中 J06、J07 都是与机架固定的运动副,其余为两个连杆的相对运动副。

为了进行运动分析,定义运动驱动(Motion),

运动驱动机构运动,为平动副 J02 选择恒定驱动,并设定驱动参数,使连杆 L01 匀速平动。

运动分析方案创建完成,检查此方案的有关信息,其中 Degrees of Freedom(DOF)的值是 0。DOF 是系统确定的机构总的自由度,其值为 0 表示机构是全约束。当运动分析限制为运动学分析时,一个主要目标就是将机构的自由度构建为 0^[6]。

2 反扭装置的运动学仿真分析

启动运动仿真对六杆机构进行运动学分析。在 RecurDyn 环境中,对反扭装置的几何模型建立约束和驱动,即对反扭装置的滑刀中支座和滑刀下支座进行固定,定义调整螺母一个驱动力,压迫弹簧,迫使滑刀上支座向右运动,带动滑刀向外扩张。然后在右侧 Database 中分别打开转动副的属性,修改名称和添加 Motion 等,时间设置为 1 s,每个 Motion 按照位移方式建立表达式;再点击操作界面上侧的 Analysis 运行仿真程序,进行运动分析。运动分析完成,以动画来表现机构的运动过程,如图 5、图 6 所示。



图 6 滑刀向外扩张后仿真动画

仿真的结果也可以以图表和电子表格的形式绘出。下面调用 Graphing 功能来绘出平动副 J02 即滑刀上支座的位移随时间的变化曲线,还有滑刀扩张位移随时间的变化曲线以及滑刀扩张位移与滑刀上支座移动的位移之间的关系。如图 7~9 所示。

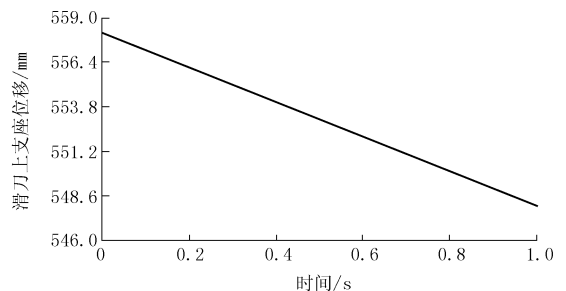


图 7 滑刀上支座的位移随时间的变化曲线

从图 7 可以看出,在驱动力对调整螺母的作用下,滑刀上支座向右运动的位移与时间成线性关系。即调整螺母在驱动力的作用下,滑刀上支座匀速前行,能够保证反扭装置运行时的稳定性。从图 8、图 9 可知,滑刀位移与时间成非线性关系,滑刀向外

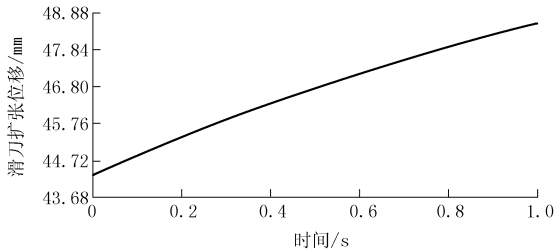


图8 滑刀扩张位移随时间的变化曲线

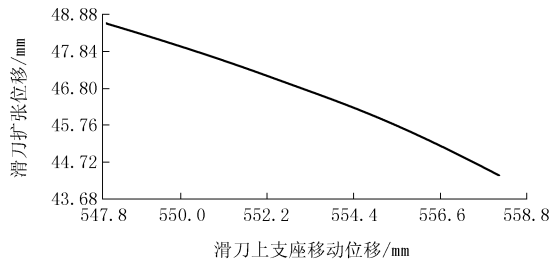


图9 滑刀扩张位移与滑刀上支座移动的位移

扩张位移与滑刀上支座移动位移成非线性关系。表明调整螺母在驱动力的作用下,挤压弹簧向右前行,从而滑刀向外扩张,当扩张到一定程度,由于孔壁的阻挡,滑刀不能继续向外扩张,此时弹簧起到缓冲作用,达到自适应状态,既能保证反扭装置不随钻具回转,同时又能保证反扭装置在冰孔内自动下滑。

通过以上分析可以得知,该反扭装置在设计上更具有科学性、合理性和可实用性,为在南极钻取冰下基岩打下了坚实基础。

3 结论

(1)通过 RecurDyn 软件对反扭装置的运动分析,能够明确的了解到反扭装置实际运动的情况,即通过对反扭装置上的调整螺母施加一个力,可以模拟出滑刀向外扩张的轨迹。

(2)通过反扭装置的仿真结果,如图7~9所示,得出反扭装置各个部件之间的线性、非线性关系,并且反扭装置上支座以及滑刀实现了预定位置的变化要求,能够满足在极地钻探技术领域中,在钻具钻进过程中,反扭装置起到平衡钻进时产生的扭矩的重要作用。

参考文献:

- [1] 曹品鲁,刘春鹏,P. G. Talalay,等. 极地冰下基岩取心钻探技术浅析[EB/OL]. 中国科技论文在线,2012-10-12.
- [2] 李芳,廖华丽. 平面六杆机构运动的计算机仿真[J]. 郑州煤炭管理干部学院学报,2000,15(2):89-90.
- [3] 焦晓娟,张潜渭,彭斌彬. RecurDyn 多体系统优化仿真技术[M]. 北京:清华大学出版社,2010.
- [4] 王咏雪. 机构运动仿真及运动分析[J]. 机械设计与研究,2002(S):103-104,136.
- [5] 侯敬巍. 基于 RecurDyn 的4自由度液压机器人的动力学建模研究[J]. 起重运输机械,2001,(3):50-53.
- [6] 葛晓忠,詹蔡华,钟克. 基于 ug 的平面连杆机构的运动分析与应用[J]. 东华大学学报(自然科学版),2008,34(3):332-334.

(上接第20页)

5 结论与建议

(1)设计的反扭装置实验台结构简单,可准确测试反扭装置所能提供的最大瞬时反扭矩、连续反扭矩和下滑阻力,实现多参数测试和采集,并且可以实现对不同类型反扭装置的测试。

(2)设计的组合式模拟冰筒可以根据需要冻制不同温度的冰层和不同孔径的冰孔,冻冰成功率高,结构简单,便于操作。

(3)反扭装置和回转轴的连接部分需要进一步改进,从而保证两者的同轴度,提高实验结果的准确性。

(4)由于深冰心钻探孔内需要灌注钻井液,因此下一步将考虑改进实验台进而研究反扭装置在充满钻井液的冰孔中的性能。

参考文献:

- [1] 王宁练,姚檀栋. 冰心对于过去全球变化研究的贡献[J]. 冰川冻土,2003,25(3):275-287.
- [2] P. G. Talalay. Russian Researchers Reach Subglacial Lake Vostok in Antarctica[J]. Advances in Polar Science,2012,23(3):176-180.
- [3] 胡正毅,达拉拉伊·帕维尔,曹品鲁,等. 气体局部反循环电动机冰钻技术[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2012,42(S3):374-378.
- [4] 杨成,曹品鲁,Pavel Talalay,等. 极地冰下基岩取心钻探仿生金刚石钻头实验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(S1):283-286.
- [5] L. Augustin, S. PANICHI, F. FRASCATI. EPICA Dome C 2 Drilling Operations: Performance, Difficulties, Results[J]. Annals of Glaciology,2007,47:68-72.
- [6] Sigfus j. Johnsen, Steffen Bo Hansen, et al. The Hans Tausen Drill: Design, Performance, Further Developments and Some Lessons Learned[J]. Annals of Glaciology,2007,47:89-98.
- [7] Yoshiyuki Fuji, Nobuhiko Azuma, et al. Deep Ice Core Drilling to 2503m Depth at Dome Fuji, Antarctica[A]. Proceedings of the Fifth International Workshop on Ice Drilling Technology[C]. Nagaoka,2002:103-116.