

基于有限元APDL参数化分析滚珠直线导轨副

■ 南京工艺装备制造有限公司（江苏 211178） 王守珏

摘要：根据滚动导轨副的结构特征，采用从端面到实体、端面网格到实体网格的建模方法，针对构件特征，建模实体单元采用八节点六面体单元solid185。该建模方法在滚动导轨副啮合特性分析中的应用表明，所建滚动导轨副参数化有限元模型具有通用性强、可移植性好、单元划分可控性好及网格易于调整等优点，可作为多种分析类型的基础模型。

滚珠直线导轨副以其精密的直线导向性、高承载、高速度、高精度、低磨损以及高刚性等特点，广泛应用于各类数控装备及自动化生产设备等领域。特别是在装备制造业上，滚动导轨副已成为数控机床和自动化设备的关键元件，其性能直接决定设备的好坏。随着机床行业全面向高精尖方向发展，对滚动导轨副的设计开发提出了更高的要求：不仅需要可以快速完成滚动导轨副的结构设计，同时更需要验证结构设计的合理性以及是否可以达到设计目标。因此必须对其进行静力学和动力学性能分析，为滚动导轨副的性能优化设计提供重要依据。

由于滚动导轨副包含滑块、导轨、返向器及多个滚动体，导致影响因素较多。用传统理论对其进行动、静力学分析较为复杂及繁琐，尤其是对其动力学方面的研究更为困难。基于有限元方法（FEM）的各种有限元软件（ANSYS、NASTRAN等）则相

对简单的多，并且被国内外广泛采用。而在有限元分析过程中，每次分析都需要大量的重复操作，会影响到分析效率。此外，通过UG、SolidWorks、Pro/E等三维软件建模并导入有限元软件进行分析时，容易使模型受损、产生缺陷，这种情况在模型较复杂、构件相对较多时显得尤为明显。因此本文拟建立一种滚动导轨副的参数化有限元建模方法，希望通过这一研究，为滚动导轨副的动、静态等分析提供一种高效参数化分析方法。

本文拟基于大型通用有限元软件ANSYS，研究滚动导轨副的参数化建模方法。根据ANSYS提供的参数化设计编程语言APDL，编制滚动导轨副参数化建模程序。本文以我公司GGB型滚动导轨副为例，研究滚动导轨副的参数化有限元建模方法及其实际应用。

1. APDL参数化滚动导轨副

基于ANSYS参数化设计语言（APDL）编写的三维有限元建

模程序，只需在程序中改变初始设计参数即可实现不同模型的快速创建，相比GUI（用户界面操作）方式，效率要高很多，故本文采用APDL建立滚动导轨副的有限元模型。

参数化建模首先需定义模型的材料参数、单元类型等，其次是定义基本设计参数，基于这些参数建立模型。其中滚动导轨副材料采用GCr15轴承钢，其弹性模量 $E=2.08 \times 10^{11} \text{Pa}$ ，泊松比 $\nu=0.3$ ，密度 $\rho=7800 \text{kg/m}^3$ ，建模实体单元使用八节点单元solid185。

滚动导轨副的结构主要包含导轨、滑块及滚动体（钢球）等，如图1所示，建模时对各零件单独建模，具体建模过程如图2所示。

建模时，第一步是建立导轨端面模型。导轨副端面轮廓主要包含平面、滚道截型及倒角等要素。其中滚道截型由圆弧构成，可通过CIRCLE命令得到。结合导轨几何特征可知，其端面对称，故可先建立端面的一半模

型，再通过ARSYM命令将其径向合并相加可得导轨端面模型，如图3所示。同样的方法可得到滑块端面模型，如图4所示。

进而由上述所建端面模型分别进行延伸生成导轨及滑块实体模型，可通过命令VEXT实现，生成导轨及滑块实体模型如图5所示。

在此基础上建立钢球模型。为方便后续选择、约束和加载的实现，通过LOCAL命令在导轨两侧两滚道的起始处建立局部坐标系，并在此坐标系下建立钢球模型。随后将两钢球通过VSYMM命令镜像复制，得到导轨另一侧两条滚道起始处的钢球模型。随后，将导轨两侧四条滚道起始处的四个钢球按滑块长度方向阵列

复制。命令为：

```
LOCAL, 12, x1, y1, z1
WPCSYS, 12
SPHERE, sr, , , ,
CM, Q1, VOLU
VSYMM, X, Q1
ALLSEL, ALL
CMSEL, S, Q1, VOLU
VGEN, (L / (2 * sr)),
ALL, , , , 2*sr
...
```

得到钢球模型如图6所示。至此，可得到完整的滚动导轨副实体模型。在实体模型的基础上，对其进行网格划分。其中，滑块及导轨的网格划分方式为通过MESH200面单元，首先对其端面划分面网格，进而通过面网格延

伸生成沿导轨长度规则分布的网格模型，钢球网格采用均匀四面体单元。可得到滚动导轨副网格模型如图7所示。

通过上述有限元参数化建模，即可针对不同的分析而对所建立的有限元模型施加约束条件、载荷、运动参数等，在此基础上根据分析类型设置不同的求解选项、迭代参数等，从而进行不同的分析。

2. APDL参数化有限元分析

基于本文所述建模方法，建立滚动导轨副模型，研究其接触特性。假设GGB型某滚动导轨副主要结构参数如附表所示，表中各符号含义如图8所示。

根据附表中的参数及图8中建

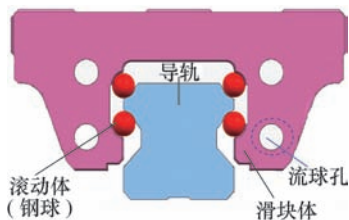


图1 滚动导轨副结构组成

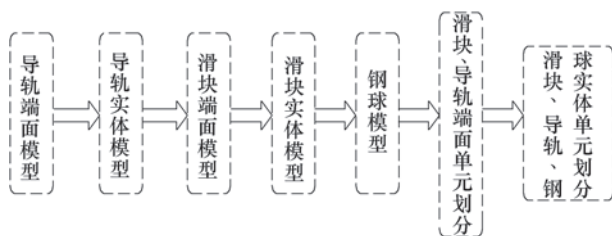


图2 滚道导轨副建模流程

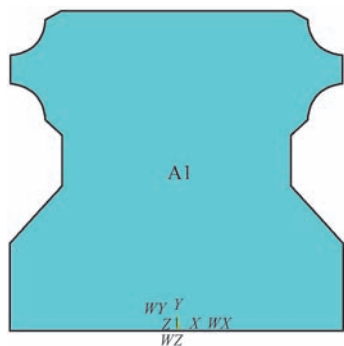


图3 导轨端面模型

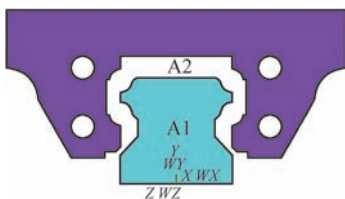


图4 滑块端面模型

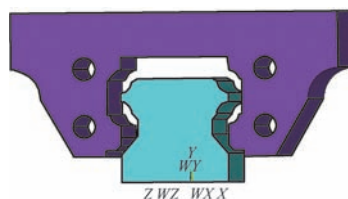


图5 导轨、滑块实体模型

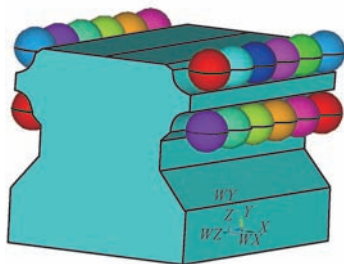


图6 钢球实体模型

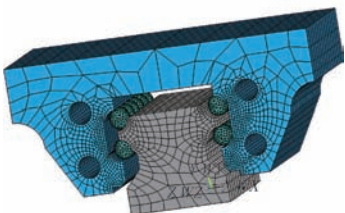


图7 滚动导轨副有限元网格模型

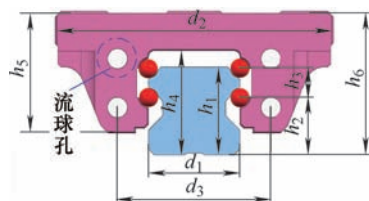


图8 滚动导轨副建模参数示意图

立的GGB型滚动导轨副有限元模型，分析滚动导轨副流球孔位置（即 d_3 ）对其接触特性的影响。

因此对滚动导轨副进行接触分析，在所建模型的基础上，定义接触对。接触单元选择CONTA174单元，目标单元选择TARGE170单元，并设置其刚度系数和穿透容差等接触对单元实常数。定义好的接触对单元如图9所示。

设置好接触参数以后，即可对模型施加约束及载荷条件。本文工况以导轨底面固定为约束、滑块顶面分布均布载荷，约束及载荷如图10所示。

进而即可设置求解选项，包括迭代参数、结果输出形式及求

解器的选择等。求解得到附表参数下的GGB型滚动导轨副最大应力，如图11所示。

在此基础上，分别对球孔位置 d_3 改变不同位置进行接触分析，分析球孔对滚动导轨副接触特性的影响。经分析并整理数据可得到球孔位置 d_3 与最大接触应力的关系如图12所示。可见球孔位置 d_3 越大，最大接触应力越小。

3. 结语

本文给出了一种滚动导轨副参数化有限元设计分析方法，结果表明：①本文参数化建模方法建立滚动导轨副有限元模型，只需修改几个建模基本参数，即可完成有限元建模，极大地提高

了分析设计效率，节省了大量重复工作时间。②基于该方法所建有限元模型，只需要施加约束、载荷等工况条件，求解选项，即可实现多种分析目的，包括静力学分析、动力学分析、振动特性（模态）分析及拓扑结构优化等分析。③基于本文所述方法建立的GGB型滚动导轨副模型，其流球孔位置对其最大接触应力有明显的影响。

本文受到国家科技重大专项“高速、重载、精密滚动功能部件产业化关键技术开发与应用研究”（2012ZX04002-012）的支持。

参考文献：

- [1] 张涛. ANSYS APDL参数化有限元分析技术及其应用实例[M]. 北京：中国水利水电出版社，2013.
- [2] 卫良保，陶元芳. 基于APDL语言的有限元三维参数化建模与分析[J]. 工程机械，2005（1）：27-29.
- [3] 谭丽芳. 基于APDL的齿轮数值仿真系统的开发及应用[J]. 电脑知识与技术，2009（25）：7233-7234.
- [4] 王新敏. 工程结构数值分析[M]. 北京：人民交通出版社，2007.
- [5] 范静锋. 滚珠直线导轨副载荷特性和结构特点对刚度影响研究[D]. 苏州：江南大学机械工程学院，2008.
- [6] 许向荣. 滚珠丝杠副直线导轨进给单元动态性能研究[D]. 济南：机械工程学院，2011.

MW（收稿日期：20160506）

附表 GGB型主要APDL结构参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
钢球直径/mm	d_0	滑块槽底高/mm	h_4
导轨宽度/mm	d_1	滑块高度/mm	h_5
导轨高度/mm	h_1	导轨副高度/mm	h_6
下滚道高度/mm	h_2	滑块宽度/mm	d_2
滚道高度中心距/mm	h_3	滚道水平中心距/mm	d_3
...	...	...	...

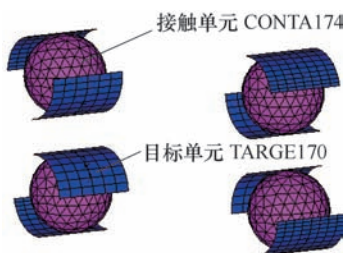


图9 滚动导轨副接触对单元

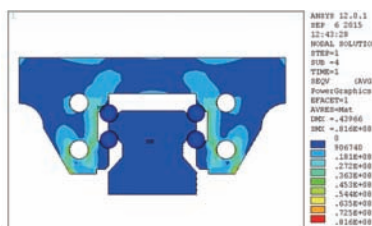


图11 工况下GGB型滚动导轨副接触应力云图

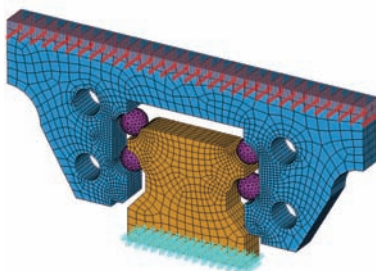


图10 滚动导轨副约束及载荷施加

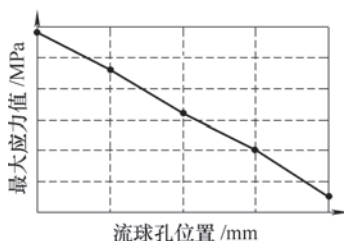


图12 最大应力与流球孔位置的关系