

放疗设备大回转架的驱动系统有限元数值模拟

□ 任亚峰¹ □ 陈惠贤¹ □ 张小奇² □ 魏跃斌¹ □ 黄耀峰¹

1. 兰州理工大学 机电工程学院 兰州 730050

2. 中国科学院 近代物理研究所 兰州 730050

摘要:放疗设备的大回转架是重载、低速、大惯量的机械装置,它的转动是依靠摩擦轮与大回转架表面接触区的摩擦力来驱动的。建立大回转架的驱动系统结构,针对摩擦滚轮和大回转架的接触区域和沿三个轴向的变形,利用 ANSYS Workbench 进行力学仿真分析和理论分析。结果表明:仿真结果和理论计算的结果在误差范围内是一致的,为大回转架驱动时的精度控制、受力变形、驱动误差补偿研究提供了依据和理论基础。

关键词:放疗设备大回转架 驱动系统 摩擦滚轮 有限元分析

中图分类号:TH123

文献标志码:A

文章编号:1000-4998(2016)01-0019-04

大回转架是放疗设备的重要组成部分,它带动治疗头旋转并发射放射粒子来实现对肿瘤的治疗,大回转架的转动是依靠滚轮驱动来实现旋转的。董思民等人^[1]对大回转架支撑驱动系统的运动机理进行分析,进而对滚轮和大回转架的传动比的实际值和理论值进行了对比。但大回转架是低速、重载、大惯量的机械装置,在驱动过程中,因滚轮与大回转架的相互作用力,产生接触变形、摩擦变形,严重制约着大回转架在支撑滚轮上驱动时的精度。因此,需对大回转架在驱动时的受力变形进行数字化和量化分析,以此来验证对精度的影响大小,获得变形的规律,然后对大回转架的驱动系统进行补偿和控制。

结构如图 1 所示,大回转架的驱动力由电动机经减速器和联轴器传递给摩擦滚轮轴,带动摩擦轮驱动,实现大回转架的驱动和旋转。大回转架结构中的主要技术参数见表 1。

2 大回转架转动结构模型的建立和受力分析

如图 2、3 所示,大回转架与两个摩擦轮接触区域受到三个相互作用力,即正压力 $F_N(x)$ 、轴向力 F_a 和驱动力 F_t 。

2.1 大回转架在转动过程中驱动力的计算

$$F_t = \frac{2T}{2R_1} = \frac{T}{R_1} \quad (1)$$

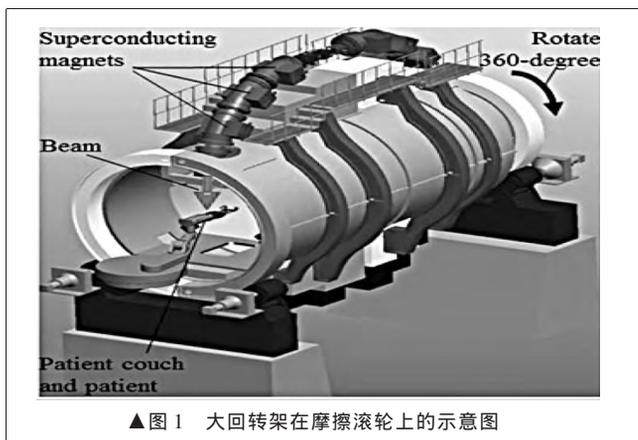
$$T = 9.549P/n \quad (2)$$

表 1 大回转架在摩擦滚轮上驱动的参数

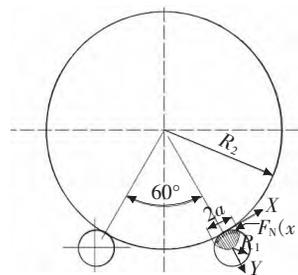
参数	数值
大回转架的半径 R_2	2.7 m
摩擦滚轮的半径 R_1	0.78 m
大回转架的弹性模量 E_2 和摩擦滚轮的弹性模量 E_1	210 GPa
大回转架的泊松比 μ_2 和摩擦滚轮的泊松比 μ_1	0.3
单位长度滚轮所受的正压力 F_N	638 125 N/m

1 结构原理

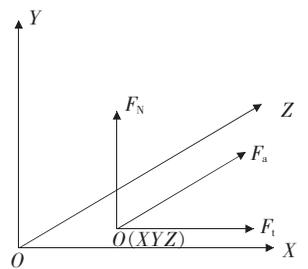
由中国科学院近代物理研究所研制的放疗设备大回转架,总质量约 100 t,直径为 5~6 m,长度为 13 m,



▲图 1 大回转架在摩擦滚轮上的示意图



▲图 2 大回转架在摩擦滚轮上的结构示意图



▲图 3 大回转架与摩擦滚轮在接触区的受力加载图

收稿日期:2015年7月

式中: T 为通过联轴器传输到摩擦滚轮的转矩, $N \cdot m$; R_1 为摩擦滚轮的半径, m ; P 为电动机输出功率, kW ; n 为电动机的转速, r/min 。

将 $P=55 kW$ 、 $R_1=0.78 m$ 、 $n=15 r/min$ 代入式 (1)~式 (2), 得: $T=35\ 013 N \cdot m$, $F_t=44.888 kN$ 。

2.2 大回转架在摩擦滚轮转动过程中的接触压力和接触区宽度

大回转架在转动过程中, 滚轮所受的载荷主要是在大回转架与滚轮接触区域受到大回转架的正压力, 根据弹性力学的 Herzt 理论^[2], 接触区的宽度为 $2a$, 接触区的正压力为 $F_N(x)$, 则:

$$a = \sqrt{\frac{4F_N R}{\pi E^*}} \quad (3)$$

式中: R 为大回转架与滚轮的相对曲率半径, m ; E^* 为大回转架与滚轮的当量弹性模量, Pa 。

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (4)$$

$$E^* = \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \quad (5)$$

将表 1 的数据代入式 (3)~式 (5), 得 $a=2.065 mm$ 。

$$F_N(x) = 2F_N(a^2 - x^2)^{1/2} / (\pi a^2) \quad (-a \leq x \leq a) \quad (6)$$

式中: 当 $x=0$ 时, 可得接触区的最大正压力 F_{N0} , 即为赫兹正压力。将表 1 中的数据代入式 (6), 可得:

$$F_{N0} = \frac{2F_N}{\pi a} = 196.8 MPa$$

3 大回转架实体模型的建立

3.1 建立实体模型

建立如图 4 的实体模型。建立模型时简化为: 大回转架的中心和摩擦滚轮中心在同一个垂直面内, 可能还受其它力导致两者的中心不均衡, 但这些力与上述三个力相比较都很小而不考虑, 摩擦滚轮的自重与大回转架上的外载荷相比较很小, 可以忽略不计。如果对圆孔和倒角在建模时保留, 则需在分析时作局部加密处理, 这将会增加单元数目, 加大计算量, 而计算精度也没明显提高。因此, 忽略圆孔, 将倒角以直角代替。

3.2 单元的选择和网格的划分

在摩擦滚轮驱动大回转架的转动过程中, 它们的接触部位承载着很大的压力、驱动力、轴向力, 存在很大的应力集中, 对这个接触区域要进行加密处理。两者未接触部位由于应力梯度比较平缓, 在满足计算精度的情况下, 为节约系统计算时间, 则将这片区域作为稀疏区进行处理, 在加密区和稀疏区之间添加过渡区, 将加密区和稀疏区的应力、应变进行平缓的过渡^[3]。对加密区和稀疏区采用扫掠法, 对过渡区采用自由法进行网格划分, 如图 5 所示。

3.3 接触对的选择

在摩擦滚轮驱动大回转架的过程中, 两者之间接触区域的接触问题是属于边界的非线性微分方程边值问题, 需采用接触非线性的有限元方法进行迭代求解。含高度非线性的, 需要建立接触单元, 建立相互之间的接触对, 根据接触对建立考虑的原则^[4], 故将大回转架的外表面作为接触面, 摩擦滚轮的表面作为目标面, ANSYS Workbench 会自动识别装配体接触对, 选择为摩擦接触, 摩擦因数选择为 0.167 6, 定义接触方式为非对称。

3.4 边界的约束

(1) 由于模型不考虑轴向运动和挡轮的作用, 则 $YOZ(X=0)$ 平面上的各个节点沿 X 方向的位移为 0。

(2) 在摩擦滚轮与大回转架的初始接触区施加沿轴向的线性约束。

(3) 摩擦滚轮是在摩擦滚轮轴的带动下传递扭矩的, 考虑到摩擦滚轮与轴的接触问题, 采用限制摩擦滚轮轴在 YOZ 平面上运动, 只保留 X 轴的旋转。

3.5 载荷的添加

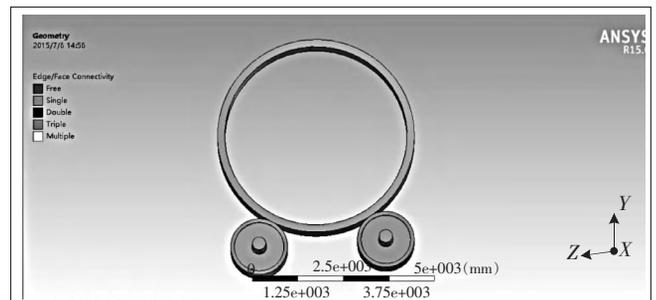
(1) 添加大回转架的自重载荷。

(2) 添加电动机传递到摩擦滚轮上的扭矩载荷。

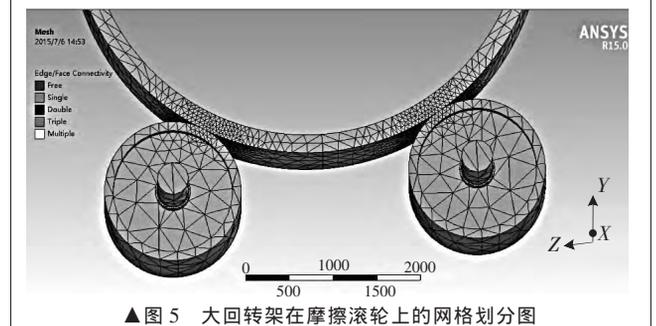
(3) 在摩擦滚轮驱动大回转架的有限元模型中, 将驱动时的驱动力按照与之相对应的赫兹正压力添加到摩擦滚轮和大回转架的接触区内, 保证在驱动力作用下所建立的大回转架能被驱动, 并能稳定旋转^[5]。

4 大回转架驱动系统的仿真结果分析

4.1 摩擦滚轮在大回转架驱动下的受力分析



▲图 4 大回转架在摩擦滚轮上的实体模型图



▲图 5 大回转架在摩擦滚轮上的网格划分图

摩擦滚轮在加载扭矩 T 及网格划分后, 边界条件约束和载荷加载后在接触区所受的等效应力云图如图 6 所示, 图 7 为接触区受力云图的局部放大图, 其中最大应力为 179.13 MPa, 而理论应力为 196.8 MPa, 相差 8.97%, 这个结果在理论的范围。

4.2 摩擦滚轮在驱动大回转架的过程中沿 X、Y、Z 三个方向的变形量分析

如图 8 所示, 沿 X 方向的变形量为 $U_{Xmin}=-2.344 2$ mm, $U_{Xmax}=-2.804 3$ mm, 其中“-”代表与所要求的 X 正向方向相反。这是由于摩擦滚轮两轴上添加扭矩 T , 滚轮与大回转架的轴线发生一定偏角, 必然导致沿 X 负向有一定的应变, 其中 $U_X=\max\{|U_{Xmax}|, |U_{Xmin}|\}=2.804 3$ mm。

如图 9 所示, 沿 Y 方向的变形量为 $U_{Ymax}=1.690 8$ mm, $U_{Ymin}=-1.690 5$ mm, 其中“-”代表与所要求的 Y 正向方向相反。这是由于大回转架和摩擦滚轮的接触区受线性载荷 F_N , 以及接触区有摩擦力和大回转架本身所有的重力都会使大回转架和摩擦滚轮沿 Y 向发生很大的形变量, $U_Y=|U_{Ymax}|+|U_{Ymin}|=3.381 3$ mm。

如图 10 所示, 沿 Z 方向的变形量为 $U_{Zmin}=1.676 8$ mm, $U_{Zmax}=-1.682 6$ mm, 其中“-”代表与所要求的 Z 正向方向相反。这是由于大回转架和摩擦滚轮的接触区受线性载荷 F_N , 以及接触区有摩擦力和大回转架本身所有的重力都会使大回转架和摩擦滚轮沿 Z 向发生

很大的形变量, $U_Z=|U_{Zmax}|+|U_{Zmin}|=3.359 4$ mm。

5 结论

(1) 大回转架在摩擦滚轮驱动下的受力(图 7)与 Hertz 理论计算接触区所受的压力(式 6)的结论在误差范围内是一致的, 而且在轴向接触区域是矩形(图 7), 端面接触区域的受力成椭圆形(图 9、图 10)。

(2) 大回转架在摩擦滚轮的接触及其驱动下沿 X、Y、Z 方向的变形, 得到在 YOZ 平面的变形最大, 进而得到大回转架在摩擦滚轮驱动的过程中, 导致大回转架的圆度发生变化, 由此严重影响治疗头的旋转精度, 因此, 可以对大回转架在 YOZ 面的转动过程进行误差补偿控制。

(3) 大回转架在驱动摩擦滚轮的驱动下, 沿 Y、Z 轴的变形量过大, 在旋转过程中, 可能会导致在大回转架和摩擦滚轮瞬时接触区发生疲劳破坏, 因此可以对

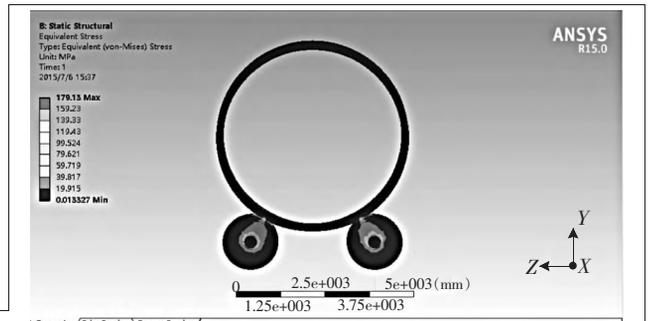


图 6 大回转架在摩擦滚轮上的受力分析

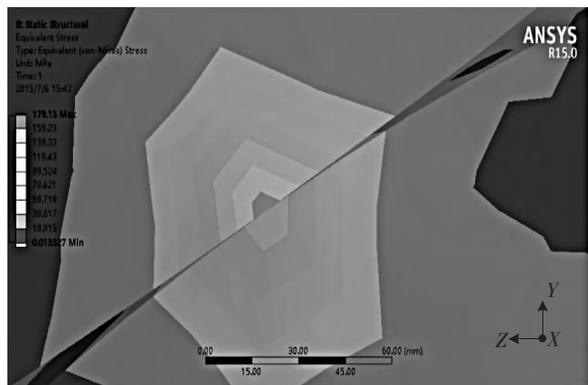


图 7 大回转架在摩擦滚轮上局部受力放大图

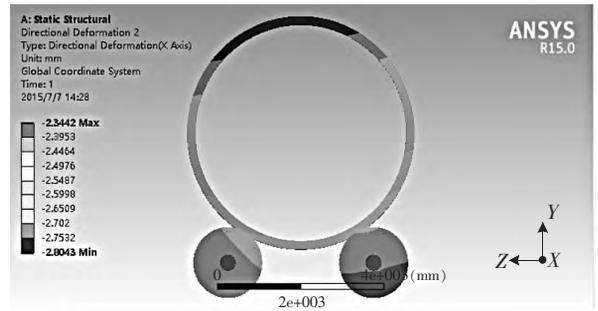


图 8 总体的 X 向变形

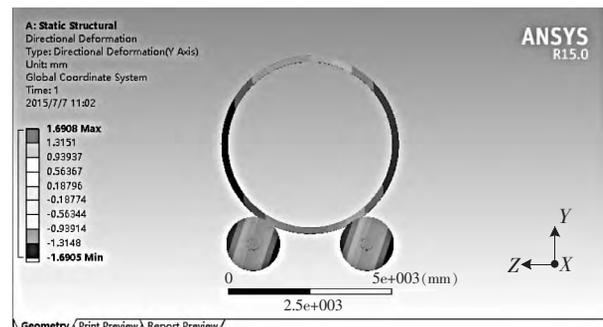


图 9 总体的 Y 向变形

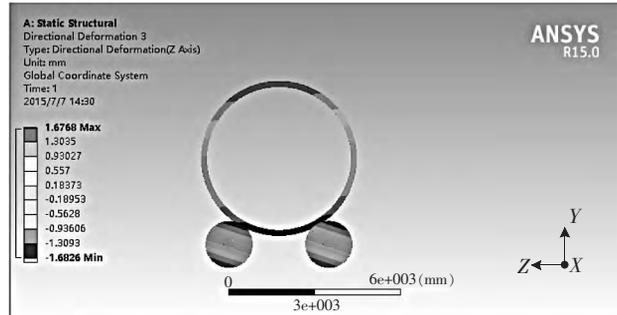


图 10 总体的 Z 向变形

(下转第 25 页)

特性测量[J].机械工程学报,2007,43(9):57-60.

[3] 王正林.Matlab/Simulink 与控制系统仿真[M].北京:电子工业出版社,2005.

[4] SMC(中国)有限公司.现代实用气动技术[M].北京:机械工业出版社,1998.

[5] Messina A, Giannoccaro N I, Gentile A. Experimenting and Modeling PWM -based Pneumatic Actuators [J]. Mechatronics, 2005, 15(7):859-881.

[6] 董胜,孙永山,王利鹏.MSP430F149 单片机在基于现场总线的智能差压变送器设计中的应用 [J].仪表技术与传感

器,2006(1):48-49.

[7] 时光.智能电-气阀门定位器智能控制策略研究 [D].重庆:重庆大学,2011.

[8] Wang J, Wang D J D, Moore P R, et al. Modelling Study, Analysis and Robust Servo Control of Pneumatic Cylinder Actuator System [J]. Control Theory and Applications, 2001, 148(1): 35-41.

[9] 李东明,孙宝元,张化岚.压电式电气转换装置实验研究 [J].大连理工大学学报,2003,43(6):771-774. ▲

(编辑 平平)

(上接第 21 页)

大回转架的接触表面增加刚度和强度。

参考文献

[1] 董思民,蒋国强,杜涵文.质子治疗装置大回转架支撑驱动系统的运动机理及其分析[J].核技术,2012,35(3):226-230.

[2] K L Johson.接触力学[M].徐秉业,罗学富译.北京:高等教育出版社,1991.

[3] 王和慧,谢可迪,陈一凡,等.大型回转窑筒体结构的力学行为分析[J].机械强度,2010,32(4):606-616.

[4] 王国强.实用工程数值模拟技术及其在 ANSYS 上的实践 [M].西安:西北工业大学出版社,1999.

[5] 王和慧,程静,周金水.大型回转窑支承系统的力学行为分析[J].机械强度,2012,34(1):77-85. ▲

(编辑 小前)

世界领先的工业技术贸易展

——汉诺威工业博览会明年 4 月举行

在“产业集成——发现解决方案!”的主题下,2016 汉诺威工业博览会将展示 100 多项全面的工业 4.0 产品——即可以帮助中国企业提高竞争力的 100 种切实可行的解决方案。

汉诺威工业博览会汇集 5 000 家参展企业和来自 100 个国家和地区的 20 万名观众参与,2016 年展会包含五大专业主题展:工业自动化展、数字化工厂展、能源展、工业零部件与分承包技术展、研究与技术展,近 1 000 场的同期论坛、研讨会和圆桌会议等将提供大量有关工业 4.0、增材制造技术、能源效率、轻质材料、预见性维护和技术转让等主题的信息。

自从 2012 年成为合作伙伴国以来,中国已成长为汉诺威工业博览会的第二大展览和参观国,与此同时,中国的劳动力成本逐渐上升,客户变得更有经验。今天,中国制造商需要在极端压力下提高质量和效率,以稳定市场份额。汉诺威工业博览会是世界领先的工业 4.0 展会,来自亚洲、欧洲和美国的所有专家都会参与到其中,制造业数字化是论坛和讲座的第一主题,对于中国企业而言,通往未来工厂之路始于汉诺威。

数字化在能源工业中同样占据重要地位,因为未来要建立完善的能源系统,需要可控制、网络化和智能化的生成和存储技术,以及网络资源。中国是世界上最大的能源消费国和生产国,目前,中国越来越关注能源效率和可持续性,正大力投资可再生能源项目,但是它将继续严重依赖以煤炭为主的传统能源。汉诺威工业博览会将展示各类常规和可再生能源技术,所以中国能源行业的观众一定能在此发现最好的解决方案。

合作伙伴国美国;工业互联网遇见工业 4.0

工业 4.0 还是工业互联网?当德国正津津乐道于工业 4.0 时,美国企业正在探讨工业互联网,两者意义相同吗?是,也不是。工业 4.0 和工业互联网均涉及与机器、数据和人类之间的连接,但方法和目标不同。工业 4.0 侧重于硬件,而工业互联网强调软件;工业 4.0 是德国提出的理念,而工业互联网是一个全球性现象;工业 4.0 仅限于制造业,而工业互联网适用于各行各业。

那么,中国如何融入其中?在 2016 汉诺威工业博览会上,中国参与者将获得与来自世界最大经济体的企业和政治家会面的机会,对比德国与美国的理念和观点,并且展示中国智能制造的愿景。在汉诺威工业博览会上,美国的工业互联网联盟(IIC)首次联手德国机械设备制造业联合会(VDMA)、德国电气和电子制造商协会(ZVEI)以及弗劳恩霍夫协会等德国领先的机构。此外,法国、荷兰、意大利和英国将推出类似的制造业政策。对于中国观众和参展商而言,这是评估各种策略的一个好机会。中国本身作为硬件和软件的生产国,将吸引诸多的关注。

汉诺威工业博览会——领先一步,掌握新技术!

世界领先的工业技术展会——2016 汉诺威工业博览会将于 2016 年 4 月 25-29 日在德国汉诺威举行,包含五大专业主题展:工业自动化展、数字化工厂展、能源展、工业零部件与分承包技术展、研究与技术展,重点关注四大主题板块:工业自动化与信息技术;能源与环保技术;工业供给、生产工艺与服务;研究与发展。美国成为 2016 汉诺威工业博览会官方合作伙伴国。