

轮胎结构有限元分析应用于轮胎结构优选 ·胎体反包高度的优选

闫相桥¹,王友善²,乌大琨²,王衍林²

(1. 哈尔滨工业大学,黑龙江 哈尔滨 150001;2. 桦林集团有限责任公司,黑龙江 牡丹江 157032)

摘要:作为轮胎结构有限元分析应用于轮胎结构优选方面的例子,探讨了载重子午线轮胎胎体反包高度的优选问题。通过对胎体反包端点、带束层端点、胎肩附近单元的应力分析参数及胎圈附近胎体张应力的综合分析,认为313低网格对应的胎体反包高度比313中网格和313高网格对应的两种胎体反包高度更合适。

关键词:轮胎;有限元;胎体;结构优选

中图分类号:TQ336.1 **文献标识码:**B **文章编号:**1006-8171(2000)05-0270-06

最近几年来,我们一直致力于轮胎结构有限元分析的研究工作,研制了一个轮胎结构非线性有限元分析软件,该软件考虑了轮胎变形的几何非线性、轮胎与地面和轮胎与轮辋的大变形非线性接触及轮胎材料的非均匀性和各向异性。关于该软件所涉及的基础理论及关键技术、软件的可靠性及应用该软件对轮胎进行充气分析、静加载分析及稳态滚动分析将在其它文章中报道。在这里仅探讨轮胎结构有限元分析在轮胎结构优选方面的应用问题。

毫无疑问,轮胎结构有限元分析对轮胎结构的优化或优选、轮胎结构的质量评估非常重要。然而,这里的难点是如何将轮胎结构有限元分析与轮胎结构的优化或优选、轮胎结构的质量评估问题有机地结合起来。

笔者1999年申报了一项题为“高性能橡胶轮胎结构-材料一体化基础研究”的国家自然科学基金重点研究项目(未获批准)。在该研究项目中,我们的观点是轮胎的优化应该是轮胎轮廓、结构、材料及材料配置一体化的优化。这是一项综合研究项目,主要研究内容包括轮胎实际工况下的数值模拟研究、轮胎结构材料实际工况下的性能研究及这种材料性能与轮胎使用

性能的关联性研究等,进而将这些研究有机地结合到一起的研究,即轮胎轮廓、结构、材料及材料配置一体化的轮胎优化研究。

作为轮胎结构有限元分析应用于轮胎结构优选方面的例子,探讨了载重子午线轮胎胎体反包高度的优选问题。作为这篇文章的续篇,轮胎结构有限元分析在轮胎带束层宽度的优选中的应用将在另文中探讨。在这里处理问题的方法似乎值得探讨。一方面,根据圣维南原理,当研究胎体反包高度的优选时,可以仅仅关注胎体反包高度对胎体反包端点附近的应力分析参数的影响。另一方面,经验表明,轮胎结构中存在所谓的双端点问题,即胎体反包端点与带束层端点相互制约的问题,一个端点问题解决了,另一个端点又出现问题。同时,Pottinger^[1]研究了轮胎-轮辋约束对轮胎-地面的接触力的影响。因此,在研究胎体反包高度的优选时,不仅关注胎体反包端点附近的应力分析参数,而且对轮胎中的关键区域的应力分析参数都进行研究。这些区域是:胎体反包端点附近、带束层端点附近、胎肩区域及胎圈附近的胎体,将这些区域中的应力分析参数综合分析做出判断。

优选中不可避免的问题是应力分析参数的选取问题。一般情况下,有限元分析提供的参量为应力场、应变场及位移场。对由橡胶及橡胶基复合材料构成的轮胎,在选取应力分析参

作者简介:闫相桥(1959-),男,河北东光县人,哈尔滨工业大学教授,工学博士,最近几年来主要从事轮胎结构有限元分析及其应用的研究工作。

数时一定要考虑结构材料的破坏形式。考虑到轮胎结构的破坏通常是带束层端点脱层、胎体反包端点脱层或开裂及胎肩脱层,而这些破坏都可以看作是橡胶材料与橡胶基复合材料的界面破坏,故所选取的应力分析参数为应变能密度(能量参数)和 Christensen 应力^[2](应力参数)。在对胎圈附近的胎体进行分析时,关注的是胎体中的张应力。

图1示出的是所分析轮胎的截面几何形状及材料分布图;图2示出的是在一个截面内的有限元网格图(在一个截面内有313个节点);图3示出的是整体有限元网格图。



图1 轮胎截面几何形状及材料分布图

1 胎体反包端点附近应力分析参数的研究

图4是所分析轮胎不同胎体反包高度端点附近的单元示意图。表1和2分别示出了充气情况和标准负荷情况下胎体反包端点附近单元的应力分析参数。鉴于轮胎各处所受的应力状态一般为复杂应力状态及轮胎结构损伤破坏的特点,这里所选取的应力分析参数为应变能密度和材料拉压性能相同情况下的 Christensen 应力。由表1和2可以看出,不论是充气情况还是标准负荷情况,胎体反包端点附近单元的应变能密度和 Christensen 应力均随着胎体反包高度的增大而增大,标准负荷情况下的胎体

反包端点附近单元的应变能密度幅值和 Christensen 应力幅值亦然。

2 胎体反包高度对胎圈附近胎体张应力的影响

图5是胎圈附近胎体单元的示意图。表3示出了充气情况下胎圈附近胎体张应力的变化规律,表4示出了标准负荷情况下胎圈附近胎体张应力和胎体张应力幅值的变化规律。从表3和4可以看出,不论是充气情况还是标准负荷情况,胎体张应力均随着胎体反包高度的增大而减小,标准负荷情况下的胎体张应力幅值亦然。

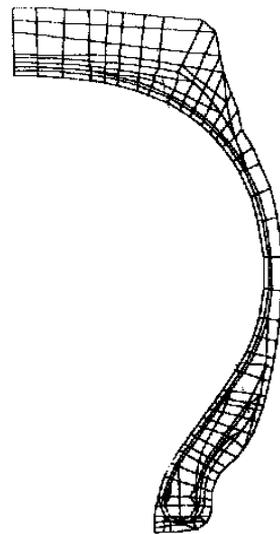


图2 在一个截面内的有限元网格图

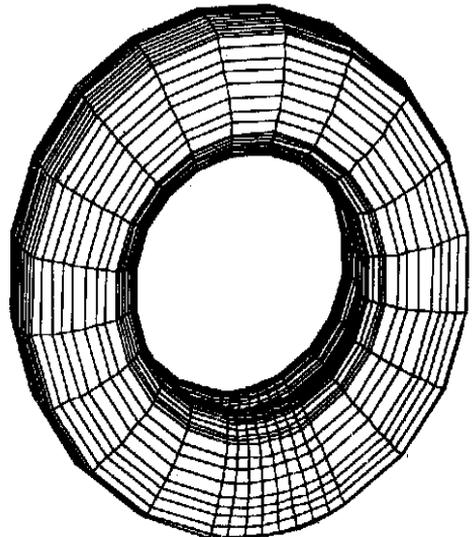


图3 轮胎整体有限元网格图

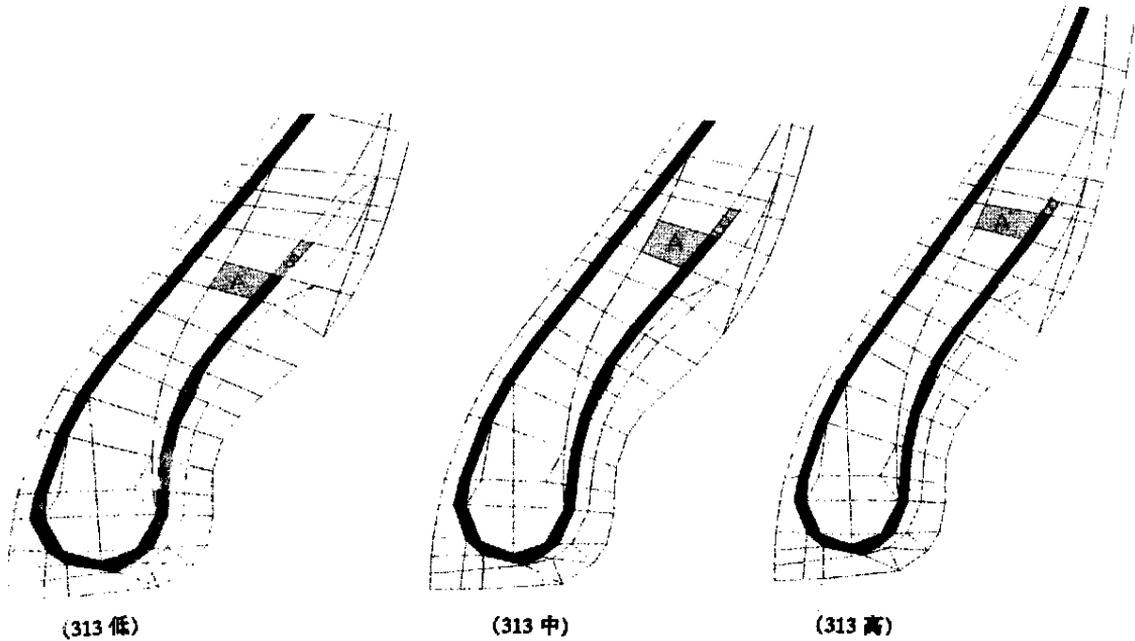


图4 不同反包高度轮胎胎体反包端点附近单元示意图

表1 充气情况下胎体反包端点附近单元的应力分析参数

反包高度方案	单元	应变能密度/ ($J \cdot m^{-3}$)	Christensen 应力/ MPa
313 低	A	9.928 9E+03	0.460 6
	B	3.728 3E+04	1.529 5
313 中	A	1.323 0E+04	0.579 8
	B	3.813 3E+04	1.854 4
313 高	A	2.115 2E+04	0.668 1
	B	4.866 3E+04	2.522 5

3 胎体反包高度对带束层端点附近应力分析参数的影响

图6是带束层端点附近单元的示意图。表5和6分别示出了充气情况和标准负荷情况下带束层端点附近单元的应力分析参数。由表5可以看出,在充气情况下,带束层端点附近单元的应变能密度和 Christensen 应力均随着胎体反包高度的增大而增大。由表6可以看出,在

表2 标准负荷情况下胎体反包端点附近单元的应力分析参数

反包高度方案	单元	最大应变能密度/ ($J \cdot m^{-3}$)	应变能密度幅值/ ($J \cdot m^{-3}$)	最大 Christensen 应力/ MPa	Christensen 应力幅值/ MPa
313 低	A	2.378 2E+04	1.578 9E+04	0.710 5	0.323 8
	B	6.952 8E+04	4.278 1E+04	2.186 8	0.613 1
313 中	A	2.736 3E+04	2.038 3E+04	0.716 5	0.362 3
	B	7.152 8E+04	5.254 0E+04	2.589 9	1.581 2
313 高	A	4.038 2E+04	3.471 2E+04	0.746 8	0.466 8
	B	8.881 2E+04	6.902 1E+04	3.381 9	2.581 8

标准负荷情况下带束层端点附近单元的最大应变能密度和最大 Christensen 应力都是 313 低网格情况最小。

4 胎体反包高度对胎肩应力分析参数的影响

图7是轮胎胎肩附近单元的示意图。表7

和8分别示出了充气情况和标准负荷情况下胎肩附近单元的应力分析参数。由表7可以看出,在充气情况下,胎肩附近单元的应变能密度均值和 Christensen 应力均值均随着胎体反包高度的增大而增大。由表8可以看出,在标准负荷情况下,胎肩附近单元的最大应变能密度

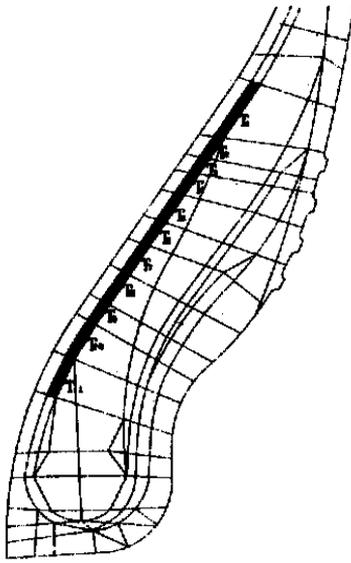


图 5 胎圈附近胎体单元的示意图

表 3 充气情况下胎圈附近胎体的张应力 MPa

单元	313 低	313 中	313 高
T ₁	50.773 93	50.284 68	49.793 66
T ₂	47.833 31	47.238 74	46.775 55
T ₃	44.954 11	44.344 54	43.914 92
T ₄	47.694 38	47.072 15	46.314 84
T ₅	49.568 46	48.505 63	47.557 24
T ₆	48.986 63	47.717 76	46.729 86
T ₇	50.659 90	49.296 17	48.408 53
T ₈	51.598 26	50.404 94	49.584 69
T ₉	49.605 10	48.583 95	47.862 67
T ₁₀	57.277 52	56.242 65	55.499 69
T ₁₁	65.540 62	64.543 80	63.826 81
均值	51.317 50	50.385 00	49.660 80

均值和最大 Christensen 应力均值都是 313 低网格情况最小。

表 4 标准负荷情况下胎圈附近胎体的张应力

MPa

单元	313 低		313 中		313 高	
	最大值	幅值	最大值	幅值	最大值	幅值
T ₁	76.879 49	34.803 19	76.065 41	34.766 88	75.135 12	34.344 10
T ₂	70.573 49	29.413 90	69.507 63	28.886 20	68.479 21	27.916 76
T ₃	65.365 78	25.397 51	64.215 78	24.550 67	63.355 21	23.720 97
T ₄	68.160 29	24.283 54	66.989 49	23.322 90	65.844 99	22.727 02
T ₅	69.185 44	21.408 83	67.564 38	20.615 32	66.200 98	19.974 66
T ₆	66.864 50	17.438 00	65.043 53	16.687 31	63.669 12	16.114 14
T ₇	67.745 73	14.269 14	65.855 51	13.561 86	64.636 16	13.184 85
T ₈	70.314 18	14.487 63	69.729 63	15.136 76	69.312 61	15.552 90
T ₉	72.597 80	17.828 00	72.159 40	18.468 35	71.803 22	18.862 71
T ₁₀	89.264 90	24.112 95	88.847 08	24.819 85	88.478 67	25.248 88
T ₁₁	106.358 00	29.419 66	105.997 40	30.237 97	105.657 50	30.830 57
均值	74.846 30	22.987 50	73.815 90	22.823 10	72.961 20	22.588 90

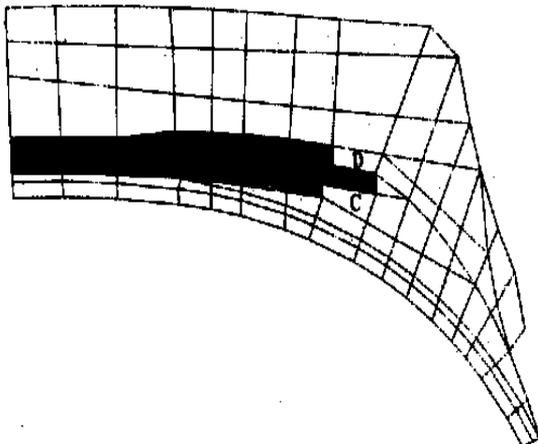


图 6 标准负荷情况下带束层端点附近单元的应力分析参数

5 结语

应用我们研制的轮胎结构有限元分析软件探讨了载重子午线轮胎胎体反包高度的优选问

表 5 充气情况下带束层端点附近单元的应力分析参数

反包高度方案	单元	应变能密度/ (J · m ⁻³)	Christensen 应 力/MPa
313 低	C	2.646 7E+02	4.072 9E- 02
	D	3.785 2E+01	1.573 9E- 02
313 中	C	2.695 0E+02	4.124 9E- 02
	D	3.977 1E+01	1.616 4E- 02
313 高	C	2.729 1E+02	4.161 5E- 02
	D	4.113 6E+01	1.646 0E- 02

表6 标准负荷情况下带束层端点附近单元的应力分析参数

反包高度方案	单元	最大应变能密度/ ($J \cdot m^{-3}$)	应变能密度幅值/ ($J \cdot m^{-3}$)	最大 Christensen 应力/ MPa	Christensen 应力 幅值/ MPa
313 低	C	1.377 5E+04	1.322 4E+04	0.408 6	0.347 2
	D	4.721 2E+04	4.710 7E+04	0.701 2	0.674 0
313 中	C	1.381 4E+04	1.325 5E+04	0.409 8	0.347 9
	D	4.733 2E+04	4.722 5E+04	0.702 1	0.674 5
313 高	C	1.380 9E+04	1.324 5E+04	0.410 0	0.347 7
	D	4.728 4E+04	4.717 4E+04	0.701 8	0.673 9

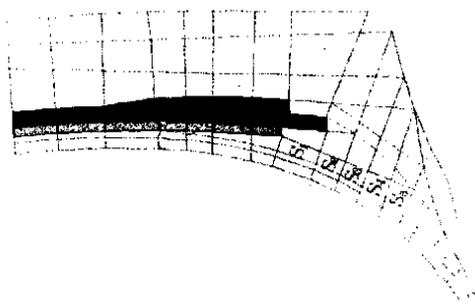


图7 胎肩附近单元的示意图

题。通过对胎体反包端点、带束层端点、胎肩附近单元的应力分析参数及胎圈附近胎体张应力的综合分析,认为313低网格对应的胎体反包高度比其它两种胎体反包高度更合适。此外,笔者所建议的应力分析参数对于探讨轮胎轮廓的优化、轮胎结构的优化(如轮胎带束层结构的优化、轮胎胎体反包高度的优化等)及轮胎材料配置的优化也许是非常有效的,也许可以作为轮胎的耐久性评价的力学参数。

表7 充气情况下胎肩附近单元的应力分析参数

单元	313 低		313 中		313 高	
	应变能密度/ ($J \cdot m^{-3}$)	Christensen 应 力/ MPa	应变能密度/ ($J \cdot m^{-3}$)	Christensen 应 力/ MPa	应变能密度/ ($J \cdot m^{-3}$)	Christensen 应 力/ MPa
S ₁	5.472 9E+02	3.864 0E-02	5.545 8E+02	3.862 0E-02	5.598 7E+02	3.863 4E-02
S ₂	1.896 1E+02	2.388 1E-02	2.008 5E+02	2.463 3E-02	2.089 6E+02	2.517 2E-02
S ₃	1.389 3E+02	1.925 2E-02	1.473 6E+02	1.976 2E-02	1.534 3E+02	2.012 2E-02
S ₄	1.045 5E+02	1.568 9E-02	1.093 8E+02	1.600 2E-02	1.127 9E+02	1.622 2E-02
S ₅	8.008 9E+01	1.150 7E-02	8.331 9E+01	1.164 3E-02	8.557 1E+01	1.173 9E-02
均值	2.120 9E+02	2.179 4E-02	2.191 0E+02	2.213 2E-02	2.241 2E+02	2.237 8E-02

表8 标准负荷情况下胎肩附近单元的应力分析参数

反包高度方案	单元	最大应变能密度/ ($J \cdot m^{-3}$)	应变能密度幅值/ ($J \cdot m^{-3}$)	最大 Christensen 应力/ MPa	Christensen 应力 幅值/ MPa
313 低	S ₁	2.800 1E+04	2.690 1E+04	0.579 1	0.525 0
	S ₂	3.076 4E+04	3.019 8E+04	0.538 5	0.494 8
	S ₃	3.576 7E+04	3.539 8E+04	0.526 2	0.494 1
	S ₄	3.252 8E+04	3.232 0E+04	0.493 1	0.469 6
	S ₅	2.943 0E+04	2.930 7E+04	0.425 8	0.410 4
	均值	3.129 8E+04	3.082 4E+04	0.512 5	0.478 8
313 中	S ₁	2.809 5E+04	2.697 9E+04	0.580 5	0.525 7
	S ₂	3.078 5E+04	3.019 9E+04	0.538 9	0.494 3
	S ₃	3.581 1E+04	3.542 9E+04	0.526 8	0.494 2
	S ₄	3.259 0E+04	3.237 6E+04	0.493 8	0.470 1
	S ₅	2.950 0E+04	2.937 4E+04	0.427 3	0.411 8
	均值	3.135 6E+04	3.087 1E+04	0.513 5	0.479 2
313 高	S ₁	2.809 7E+04	2.697 1E+04	0.580 5	0.525 3
	S ₂	3.072 1E+04	3.012 3E+04	0.538 6	0.493 4
	S ₃	3.574 3E+04	3.535 3E+04	0.526 6	0.493 6
	S ₄	3.253 6E+04	3.231 9E+04	0.493 6	0.469 7
	S ₅	2.945 7E+04	2.933 0E+04	0.427 7	0.412 1
	均值	3.131 1E+04	3.081 9E+04	0.513 4	0.478 8

参考文献:

[1] Pottinger M G. The three-dimensional contact patch stress field of solid and pneumatic tires[J]. Tire Science and Technology, 1992, 20(1) :3.
 [2] Christensen R M. The numbers of elastic properties and fail-

ure parameters for fiber composites [J]. Transactions of ASME Journal of Engineering Materials and Technology, 1998, 120(1) :110.

收稿日期:1999-11-15

Application of FEA to tire structure optimization

I. Optimization of turn-up height

YAN Xiang-qiao¹, WANG Your-shan², WU Da-kun², WANG Yan-lin²

(1. Haerbin University of Technology, Haerbin 150001; 2. Hualin Group Co., Ltd., Mudanjiang 157032)

Abstract : Taking the optimization for the turn-up height of radial truck tire as example, the application of FEA to the optimization of tire structure was discussed. Through a comprehensive analysis of the stress analytical parameters in elements near turn-up ends, belt ends and shoulders and the tension in carcass near beads, it was considered that the turn-up height corresponding to 313 low net was more suitable than those corresponding to 313 middle net and 313 high net respectively.

Key words : tire; finite element; carcass; structure optimization

1999 ~ 2005 年世界汽车轮胎销售量

中图分类号: TQ336.1 文献标识码: D

亿条

项 目	西欧	中欧和俄罗斯	北美	南美	亚洲	其它地区	总计	增长率/ %
1999 年								
轿车轮胎	2.035	0.463	2.702	0.359	1.268	0.262	7.089	1.2
载重轮胎	0.310	0.270	0.560	0.220	1.000	0.190	2.550	1.1
2000 年(预计)								
轿车轮胎	2.044	0.478	2.728	0.386	1.311	0.266	7.213	1.7
载重轮胎	0.307	0.212	0.591	0.222	1.027	0.194	2.553	1.5
2001 年(预计)								
轿车轮胎	2.042	0.490	2.745	0.403	1.350	0.270	7.300	1.2
载重轮胎	0.311	0.218	0.803	0.235	1.043	0.201	2.611	2.3
2002 年(预计)								
轿车轮胎	2.049	0.502	2.773	0.421	1.385	0.282	7.412	1.5
载重轮胎	0.315	0.221	0.609	0.247	1.063	0.206	2.661	1.9
2003 年(预计)								
轿车轮胎	2.056	0.514	2.802	0.446	1.424	0.312	7.554	1.9
载重轮胎	0.315	0.226	0.612	0.257	1.087	0.211	2.708	1.8
2004 年(预计)								
轿车轮胎	2.072	0.532	2.815	0.449	1.464	0.355	7.667	1.7
载重轮胎	0.320	0.231	0.614	0.265	1.109	0.218	2.757	1.8
2005 年(预计)								
轿车轮胎	2.080	0.548	2.813	0.490	1.490	0.377	7.798	1.4
载重轮胎	0.328	0.238	0.612	0.272	1.140	0.224	2.814	2.1