

doi: 10.13241/j.cnki.pmb.2015.16.009

## 微种植体支抗内收及压低上前牙的有限元研究\*

金晶<sup>1</sup> 冯雪<sup>1△</sup> 孙婧婧<sup>1</sup> 李永刚<sup>1</sup> 王为<sup>2</sup>

(1 第四军医大学口腔医院正畸科 陕西 西安 710032; 2 乌鲁木齐大为科技有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000)

**摘要 目的:**探讨在利用微种植体支抗整体内收前牙过程中增加前牙区不同位置压低力对上颌前后牙的生物力学效应的影响。**方法:**采用螺旋 CT 扫描获取图像并结合 MIMICS 等软件进行三维重建,建立拔除上颌第一前磨牙整体内收前牙的三维有限元模型,分析利用第二前磨牙与第一磨牙间微种植体整体内收前牙过程中,增加前牙区不同位置压低力后前后牙的生物力学效应。**结果:**增加前牙区压低力后,前牙舌向倾斜移动明显减小,不同位置的垂直向力对前牙的影响不同,第一磨牙在整体内收过程中表现为远中倾斜移动。**结论:**①增加前牙区压低力能够实现对前牙转矩的有效控制;②增加前牙区的压低力使前牙更趋向于整体移动;③在微种植体支抗内收前牙过程实现了较好的垂直向控制。

**关键词:**三维有限元;微种植体支抗;生物力学

**中图分类号:**R783.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1673-6273(2015)16-3038-04

## A Finite Element Analysis of En-mass Retraction with Vertical Traction\*

JIN Jing<sup>1</sup>, FENG Xue<sup>1△</sup>, SUN Jing-jing<sup>1</sup>, LI Yong-gang<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>2</sup>

(1 Department of Orthodontics, School of Stomatology, Fourth Military Medical University, Xi'an, Shaanxi, 710032, China;

2 Urumqi DW Innovation Information Technology Company, Urumqi, Xinjiang, 830000, China)

**ABSTRACT Objective:** To investigate the biomechanical effects of en-mass retraction with different kinds of vertical traction on maxillary teeth. **Methods:** A three dimensional finite element model of en-mass maxillary anterior teeth retraction force system was constructed with CT scanning and MIMICS software, the initial displacement of maxillary teeth was calculated when adding vertical traction between anterior teeth. **Results:** Lingual tipping of anterior teeth decreased with vertical traction; The different locations of vertical force cause different effects on anterior teeth; The first molar seems to move in a way of distal tipping. **Conclusions:** Torque of anterior teeth could be easily controlled when adding vertical traction; Bodily movement seems more likely to occur with vertical traction; Vertical control was realized in en-mass retraction with micro-implant anchorage.

**Key words:** Finite element analysis(FEA); Micro-implant anchorage(MIA); Biomechanics

**Chinese Library Classification(CLC):** R783.5 **Document code:** A

**Article ID:** 1673-6273(2015)16-3038-04

### 前言

上颌凸度是影响侧貌美观的重要因素,前突的上颌以及相对后缩的下颌严重影响患者的美观和心理健康,临床多采用拔除上颌第一前磨牙并利用微种植体支抗最大限度内收前牙的方式进行掩饰性治疗<sup>[1,2]</sup>。然而,临床中经常出现内收后前牙过度直立转矩丧失的情况,导致深覆合的出现,影响面型的美观。增大弓丝的尺寸或增大前牙的冠唇向转矩可在一定程度上减少这种情况的发生,但这会增大滑动内收过程中的摩擦阻力,增加对支抗的需求,不利于间隙的关闭<sup>[3,4]</sup>。本研究拟建立微种植体支抗整体内收前牙的三维有限元模型,并增加前牙区压低力以改变作用力线的方向,探讨不同加载方式下上颌牙的生物力学效应,旨在寻找更加合理的应用方式。

### 1 材料和方法

#### 1.1 微种植体支抗 - 直丝弓整体内收前牙的三维有限元模型的建立

**1.1.1 建模材料的获取** 选择一名上颌前突并拔除双侧第一前磨牙的患者,经排齐整平后,采用美国 GE 公司的 64 排螺旋 CT 自颧弓至上颌合平面进行连续扫描,扫描条件为 100 kV, 50 mA,扫描间距为 0.625 mm,获取图像以 DICOM 格式存储,并导入 Mimics17 软件(Materialize Software, Leuven, 比利时)进行三维重建。在 MIMICS 软件中通过阈值化操作提取出皮质骨、牙体组织的信息,然后运用软件中的 Erase 命令去除本实验建模不需要的部分以及托槽、金属伪影等干扰信息,并运用 Calculate 3D 命令生成初步的三维模型。

**1.1.2 牙周膜的建立** 将上述初步形成的三维模型导入逆向工程软件 Geomagic Studio 2013 (RaindropGeoMagic 公司,美国)对上颌骨及上颌牙列进行表面的精修细化、去除噪点及尖

\* 基金项目:陕西省科技计划项目(2012JM4036)

作者简介:金晶(1987-),女,硕士研究生,主要研究方向:正畸生物力学,电话:029-84776137, E-mail: jinjing2012zj@163.com

△ 通讯作者:冯雪(1970-),女,博士,副教授,硕士研究生导师,研究方向:错合畸形治疗机制以及成骨细胞的力学信号转导,

E-mail: fengxue2000@yahoo.com.cn

(收稿日期:2015-01-11 接受日期:2015-01-30)

细结构,使表面光顺化。优化后的模型运用偏移操作向外围均匀的扩展 0.20 mm<sup>[5,6]</sup>,得到了牙周膜的前体模型,再运用曲面功能生成其实体模型。

**1.1.3 MBT 直丝弓托槽的建立** 采用 MBT 托槽的产品数据,应用 UG NX 三维机械制图专用软件(UG NX 公司,德国)绘制出托槽的草图,然后应用该软件中的拉伸和布尔命令,得到托槽的实体模型,通过微调托槽模型使之与牙体保持临床中实际的位置关系,并与牙冠表面贴合。

**1.1.4 微种植体模型的建立及各部分模型的装配** 根据微种植体支抗在临床中的应用,后牙区种植体植入于第二前磨牙与第一磨牙之间,定义为直径 1.5 mm,骨内长度 8 mm,种植体的高度为距牙槽嵴顶 5 mm<sup>[7]</sup>,内收力值为 200 g<sup>[8]</sup>,前牙区种植体定义为直径 1.5 mm,骨内长度 4 mm,设计微种植体植入于 A:无前牙区种植体 B:中切牙间;C 中切牙与侧切牙之间;D 侧切牙与尖牙之间三种情况,压低力每侧 50 g<sup>[9]</sup>将已建立的上颌骨、上颌牙列、牙周膜、MBT 托槽、弓丝、微种植体按照设定的组合关系建立多个组合模型,并将上述模型导入有限元分析软件(Ansys Workbench 13(ANSYS, Inc, 美国),最终生成微种植体支抗整体内收及压低前牙的三维有限元模型(图 1)。

Geometry

2014/12/1 21:54

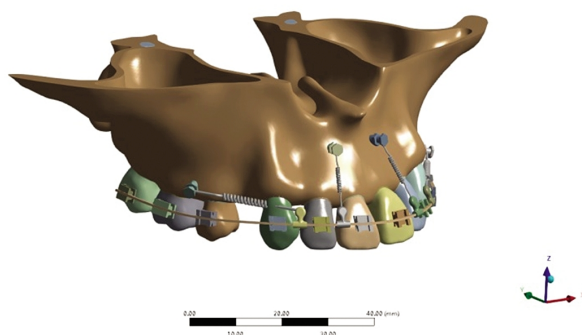


图 1 微种植体支抗内收及压低上颌前牙的三维有限元模型

Fig.1 Finite element model of en-mass retraction with vertical traction

## 1.2 实验条件的设定

**1.2.1 材料属性与网格划分** 本模型设定托槽、弓丝及牵引钩的材料一致,各种材料均为均质各向同性,拉簧弹力设置为受力的虚拟单元,皮质骨为 1.5 mm<sup>[10]</sup>的壳单元。模型采用四面体网格划分技术生成四面体单元,共分为 952372 个单元和 1704979 个节点。材料参数<sup>[9]</sup>见表 1。

表 1 模型的材料参数

Table 1 Material properties of FEA model

| Material          | Young's modulus/MPa | Poisson's ration |
|-------------------|---------------------|------------------|
| Cortical bone     | 13700               | 0.30             |
| Spongy bone       | 1370                | 0.30             |
| PDL               | 0.667               | 0.45             |
| Tooth             | 19600               | 0.30             |
| Arch-wire/bracket | 200000              | 0.30             |

**1.2.2 边界条件及计算条件的设定** 牙齿与托槽间的接触定义为 bonded 类型,托槽与弓丝之间的接触定义为 no separation 类型,弓丝可以发生滑动,垂直向不发生分离。由于模型左右基本对称,为简化计算,以右侧为研究对象,以切牙切缘中点,尖牙牙尖和根尖点,第一磨牙近远中颊尖,近远中舌尖和腭根根尖点作为参考点,定义 X 轴为水平向,向右为正。Y 轴为矢状向,向后为正,Z 轴为垂直向,向上为正。

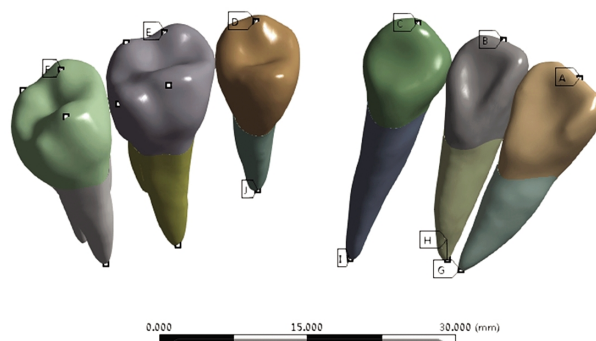


图 2 测量观测点

Fig.2 Location of the selected nodes

## 2 结果

### 2.1 前牙移动趋势

如图 3 所示,在内收力作用下,矢状向上,前牙牙冠远中移动(+Y),中切牙、侧切牙牙根表现为远中移动趋势(+Y),尖牙牙根表现为近中移动趋势(-Y),矢状向冠根位移的差值可反映牙齿唇舌向倾斜移动的程度,侧切牙倾斜程度最小,尖牙的倾斜程度最大。垂直向上,中切牙、尖牙表现为伸长(-Z),侧切牙表现为压低(+Z)。根据以上结果分析,在内收过程中,上颌前牙表现为不同程度的倾斜移动,均显示为顺时针旋转,且中切牙尖牙有伸长趋势,这一结果很好地解释了临床中前牙整体内收过程中出现的前牙过度直立以及深覆合现象的生物学基础。

增加前牙区种植体后,除垂直向位移增加外,最有意义的为矢状向上牙冠及牙根位移的变化。矢状向上牙冠远中移动趋势(+Y)均减小,中切牙、侧切牙牙根远中移动趋势(+Y)增加,尖牙牙根近中移动趋势(-Y)减小,矢状向上冠根差值明显减小,且中切牙表现为随微种植体后移,冠根差值稍有增大,舌向倾斜程度增加,侧切牙及尖牙均表现为随微种植体后移,冠根差值减小,舌向倾斜程度减小(见表 2)。

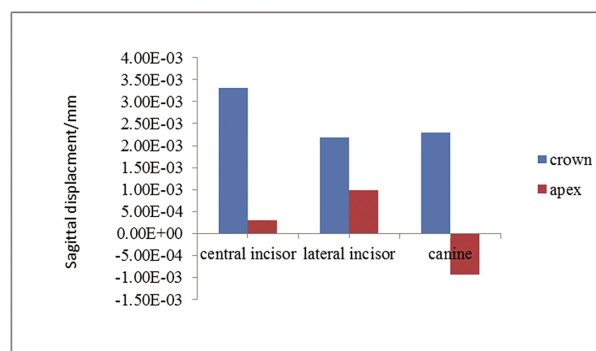


图 3 前牙矢状向冠根位移

Fig.3 Sagittal displacement of the selected nodes of anterior teeth

表 2 不同加载条件下前牙矢状向上冠根位移差值

Table 2 The difference of crown and apex of anterior teeth on Y axes under different conditions

| Tooth           | A        | B        | C        | D        |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|
| Central incisor | 3.00E-03 | 4.64E-04 | 1.83E-03 | 2.85E-03 |
| Lateral incisor | 1.19E-03 | 4.30E-04 | 3.80E-04 | 2.50E-04 |
| Canine          | 3.22E-03 | 2.89E-03 | 2.48E-03 | 2.23E-03 |

Note: A: without anterior MIA; B: anterior MIA between central incisors; C: anterior MIA between central incisor and lateral incisor; D: anterior MIA between lateral incisor and canine.

## 2.2 第一磨牙的位移趋势

在内收力作用下,水平向上,近中颊尖颊向移动(+X),远中舌尖舌向移动(-X),磨牙有远中舌向旋转趋势,二者位移之差可表示第一磨牙远中舌向旋转的程度。矢状向上,牙冠标志点均远中移动(+Y),说明牙冠远中倾斜移动;垂直向上,近中颊尖表现为伸长(-Z),远中颊尖表现为压低(+Z),近远中颊尖垂直向位移之差可表示第一磨牙远中倾斜的程度。综上,在微种植体整体内收前牙过程中,第一磨牙表现为伴有远中舌向旋转及远

中倾斜的复杂运动。

增加前牙区微种植体后,第一磨牙在整体移动趋势不变的情况下,产生微小的变化,主要表现为随前牙区微种植体后移,第一磨牙远中倾斜程度减小,而舌向扭转程度增加,第一磨牙的远中倾斜有利于增加生理性支抗,而磨牙的舌向扭转是临床中应当避免的。因此,当增加中切牙间微种植体时,可产生最大的远中倾斜和最小的舌向扭转,较适合临床应用。

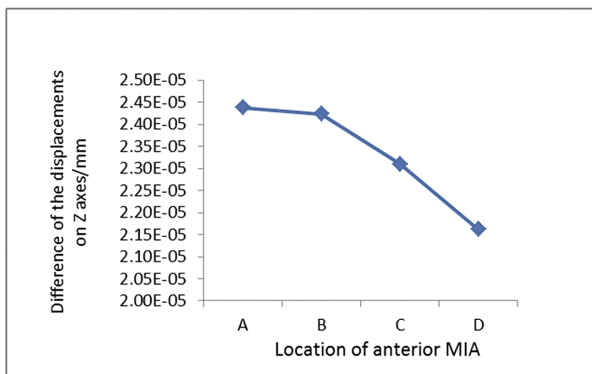


图 4 第一磨牙近远中颊尖垂直向位移差值

Fig.4 The difference of mesio-buccal and disto-buccal cusp of the first molar on Z axes

Note: A: without anterior MIA; B: anterior MIA between central incisors; C: anterior MIA between central incisor and lateral incisor; D: anterior MIA between lateral incisor and canine.

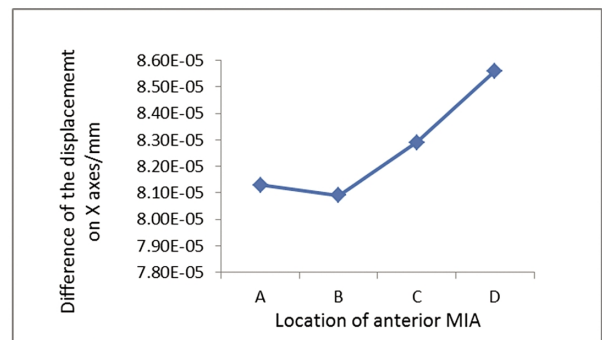


图 5 第一磨牙近中颊尖与远中舌尖水平向位移差值

Fig.5 The difference of mesio-buccal cusp and disto-lingual cusp of the first molar on X axes

Note: A: without anterior MIA; B: anterior MIA between central incisors; C: anterior MIA between central incisor and lateral incisor; D: anterior MIA between lateral incisor and canine.

## 3 讨论

自 1999 年 Park<sup>[11]</sup>利用微螺钉种植体对上颌施加 6 个月的正畸力使前牙整体内收 4 mm,种植体支抗-滑动法内收前牙这一矫治技术得到了广泛的关注和临床应用,随之出现的前牙转矩丧失问题也使学者们不断的探索更好的矫治力系。微种植体的植入高度和位置决定矫治力的方向,而力的方向是决定内收过程中牙齿移动方式的重要因素。作为“绝对支抗”,微螺钉种植体不仅可以实现最大限度的前牙内收,解决支抗问题,还可通过改变种植体的位置、高度,或增加种植体的数量实现对前牙转矩的有效控制。

第二前磨牙与第一磨牙颊侧根间植入微种植体是内收上颌前牙的最佳选择,然而由于解剖结构的限制,微种植体在垂直向的位置变化范围有限<sup>[12]</sup>,难以避免内收过程中前牙转矩的丧失。本实验结果显示单纯使用内收力时,前牙的舌向倾斜移动明显,转矩丧失,并有少量的伸长;增加前牙区不同位置的压

低力后,前牙在内收的同时压低量增加,牙冠舌向移动量减少,前牙舌向倾斜移动趋势减小,转矩得到控制,且增加侧切牙与尖牙间微种植体时,侧切牙与尖牙均表现为最小的倾斜程度,中切牙倾斜程度也较小,此时可获得更加理想的内收效果。

阻抗中心一直是学者们研究的一个热点。Sung<sup>[8]</sup>的研究认为前牙段的阻抗中心位于正中矢状面上,弓丝上方 9 mm,弓丝中点后方 13.5 mm 处;王华桥<sup>[13]</sup>认为上颌 6 颗前牙的阻抗中心高度为牙槽嵴顶上方 5.1 mm 处;Dermat<sup>[14]</sup>等的研究认为这一阻抗中心在尖牙远中 3 mm 的矢状面上,研究结果的不同可能与测量方法,牙齿的轴倾度,长度,形态,牙槽骨水平,牙周膜特性等因素有关<sup>[15]</sup>。但 Bouraual<sup>[16]</sup>提出了不同的观点,他的有限元研究认为不存在共同的阻抗中心,前牙的整体移动也很难达到。本实验中未对阻抗中心的具体位置做详细的研究,然而实验结果显示,增加前牙区微种植体能够显著改变作用力线的方向,前牙的倾斜移动明显减小,但未出现绝对的整体移动。尽管存在争议,阻抗中心这一概念的理解对于理解间隙关闭过程中

的牙齿移动仍十分重要。

第一恒磨牙被称为合的关键,其位置对患者的功能和美观均有重要影响。关闭间隙过程中对磨牙位置的控制十分关键,支抗丧失将导致错合加重,使面型改善更加困难。Kuroda<sup>[7]</sup>和Hua La<sup>[18]</sup>等人在传统支抗的研究中均发现在整体内收前牙的过程中磨牙有2.5~3 mm的近移量,磨牙的近移导致支抗丧失前牙内收受限,面型改善不佳。而在本实验利用微种植体滑动法内收前牙的研究中,第一磨牙表现为远中倾斜移动,增加了生理性支抗<sup>[19]</sup>,实现了较好的垂直向控制,而这也正是 Tweed理论所主张的稳定合的标准<sup>[20]</sup>。

基于机械力学的原理,本实验建立了仿真度较高的三维有限元模型并对相关力学现象进行分析,将生物力学的观点融入矫治设计以获得更好的预见性,具有一定的临床指导意义。然而,由于计算过程中对生物学结构的性质进行了假设,如将各结构假设为各向均质同性,这与生物体的实际性质不符,是本研究的局限性所在。同时,分析仅显示受力瞬间牙周膜形变导致的瞬时位移,与牙周组织改建下的长期的牙齿移动并不完全一致,因此进一步的研究仍需进行。

#### 4 结论

根据本实验建立的三维有限元模型及相关数据分析,我们得出以下结论:①整体内收前牙过程中增加前牙区压低力能够实现对前牙转矩的控制;②增加前牙区的压低力使前牙更趋向于整体移动;③第一磨牙在微种植体内收前牙过程中表现为远中倾斜移动,实现了较好的垂直向控制。

#### 参考文献(References)

- [1] Seong-Hun Kim, Young-Suk Hwang, Andre Ferreira, et al. Analysis of temporary skeletal anchorage devices used for en-masse retraction: A preliminary study [J]. American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, 2009, 136(2): 268-276
- [2] Kyu-Rhim Chung, Do-Min Jeong, Seong-Hun Kim, et al. En-masse retraction dependent on a temporary skeletal anchorage device without posterior bonding or banding in an adult with severe bidentoalveolar protrusion: seven years posttreatment [J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2012, 141(4): 484-494
- [3] Meling TR, J Odegaard, E O Meling. On mechanical properties of square and rectangular stainless steel wires tested in torsion [J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 1997, 111(3): 310-320
- [4] Dayanne Lopes, Claudia Trindade Mattos, Eduardo Franzotti, et al. Cross-section dimensions and mechanical properties of esthetic orthodontic coated archwires [J]. American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, 2013, 143(4): 85-91
- [5] Seong Cheon Lee, Jae Hyun Park, Mohamed Bayome, et al. Effect of bone-borne rapid maxillary expanders with and without surgical assistance on the craniofacial structures using finite element analysis [J]. American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, 2014, 145(5): 638-648
- [6] Kojima Y, J Kawamura, Hisao, et al. Finite element analysis of the effect of force directions on tooth movement in extraction space closure with miniscrew sliding mechanics [J]. American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, 2012, 142(4): 501-508
- [7] Ning Zhang, Yuxing Bai, Song Li. Treatment of a class II Division I malocclusion with miniscrew anchorage [J]. American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, 2012, 141(6): e85-93
- [8] Sang-Jin Sung, Gang-Won Jang, Youn-Sic Chun, et al. Effective en-masse retraction design with orthodontic mini-implant anchorage: A finite element analysis [J]. American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, 2010, 137(5): 648-657
- [9] Lu Hong-fei, Mai Zhi-hui, Chen Qi, et al. Initial stress distribution of the maxillary anterior teeth, periodontal ligament and alveolar bone by different intruding loadings [J]. Journal of Clinical Rehabilitative Tissue Engineering Research, 2011, 15(48): 8964-8967
- [10] Feng Pan, Chung H Kan, Hong Zhou, et al. The anatomical evaluation of the dental arches using cone beam computed tomography - an investigation of the availability of bone for placement of mini-screws [J]. Head & Face Medicine, 2013, (9): 13-22
- [11] Lin J C, Liou E J. A new bone screw for orthodontic anchorage [J]. J Clin Orthod, 2003, 37(12): 676-681
- [12] Deepak Victor, Ramchandra Prabhakar, Karthikeyan, et al. Effectiveness of Mini Implants in Three-Dimensional Control During Retraction-A Clinical Study [J]. Journal of Clinical and Diagnostic Research, 2014, 12(8): 227-232
- [13] Wang Hua-qiao, Deng Feng, Zhang Yi, et al. Determining centre of resistance of maxillary anterior teeth in en-masse retraction with micro-implant anchorage: a finite element analysis [J]. Acta Academiae Medicinae Militaris Tertiae, 2010, (07): 669-671
- [14] Dermaut L R, B M Vanden. Evaluation of intrusive mechanics of the type "segmented arch" on a macerated human skull using the laser reflection technique and holographic interferometry [J]. Am J Orthod, 1986, 89(3): 251-263
- [15] Burstone C J, R J Pryputniewicz. Holographic determination of centers of rotation produced by orthodontic forces [J]. Am J Orthod, 1980, 77(4): 396-409
- [16] Drescher D, C Bourauel, H A Schumacher. Frictional forces between bracket and arch wire [J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 1989, 96(5): 397-404
- [17] Shingo Kuroda, Kazuyo Yamada, Toru Deguchi, et al. Class II malocclusion treated with miniscrew anchorage: Comparison with traditional orthodontic mechanics outcomes [J]. American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, 2009, 135(3): 302-309
- [18] Lai E H, Chung-Chen Jane Yao, I Chen, et al. Three-dimensional dental model analysis of treatment outcomes for protrusive maxillary dentition: Comparison of headgear, miniscrew, and miniplate skeletal anchorage [J]. American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, 2008, 134(5): 636-645
- [19] Hong Su, Bing Han, Sa Li, et al. Factors predisposing to maxillary anchorage Loss: A retrospective study of 1403 cases [J]. PLoS ONE, 2014, 9(10): e109561
- [20] Klontz H A. Facial balance and harmony: an attainable objective for the patient with a high mandibular plane angle [J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 1998, 114(2): 176-188