·临床决策·

种植术中三维空间位阻的几何分析：器械长度与种植引导方式的临床决策

于海洋 詹美均 解晨阳 孙蔓琳 崔爱民 张欣萍 付馨靓 杨扬
口腔疾病防治全国重点实验室 国家口腔医学中心 口腔疾病国家临床医学研究中心
四川大学华西口腔医院修复科，成都 610041

[摘要] 现有正确种植位点的设计常不包含术区有限的几何空间可能对器械操作限制的评估，会导致术中出现“三维空间位阻”而无法按预设几何位置完成植入。本文基于前期提出的“种植术区开口度（SO）”新概念及其分类体系，通过将植入术拆分为器械就位与器械工作2个阶段，建立完整的几何分析模型、定义关键几何参数，实现了对避开位阻所需的最小器械长度的精准计算，获得了匹配的不同开口度需求，最终构建从“解剖空间评估”到“器械长度优选”再到“引导方式决策”的完整路径，实现了精准的种植位点虚拟设计评估与植入术可及性的全面评价。本文进一步完善了SO的临床决策体系，为数字化种植术前设计的临床实施提供了完整的算术方案。

[关键词] 种植术区开口度； 三维空间位阻； 临床决策
[中图分类号] R783 **[文献标志码]** A **[doi]** 10.7518/hxkq.2025519

本文链接 开放科学标识码

Geometric analysis of three-dimensional position blocking in implant surgery: clinical decision making of instrument length and implant guidance methods

Yu Haiyang, Zhan Meijun, Xie Chenyang, Sun Manlin, Cui Aimin, Zhang Xinping, Fu Xinliang, Yang Yang
State Key Laboratory of Oral Diseases & National Center for Stomatology & National Clinical Research Center for Oral Diseases & Dept. of Prosthodontics, West China Hospital of Stomatology, Sichuan University, Chengdu 610041, China

Supported by: Project of Science and Technology Department of Sichuan Province (2025ZDZX0048)

Correspondence: Yu Haiyang, E-mail: yhyang6812@scu.edu.cn

[Abstract] The current design of ideal implant sites often fails to include the assessment of the restrictions imposed by the limited geometric space of the surgical area on instrument manipulation. This limitation may cause three-dimensional position blocking during actual surgery, resulting in the inability to complete implantation at the predesigned geometric position. On the basis of the previously proposed new concept and classification system of surgical area mouth opening (SO), this work divides the surgical procedure into two stages: instrument placement and instrument working. The minimum instrument length required to avoid blocking are precisely calculated and different SO requirements are matched by establishing a complete geometric analysis model and defining key geometric parameters. Consequently, a complete pathway from anatomical space assessment, to instrument length selection, and then to guidance method decision is constructed, realizing a comprehensive and accurate assessment of the virtual designed implant site and the evaluation of the accessibility of the implantation operation. This study further improves the clinical decision-making system of SO and provides a complete arithmetic scheme for the clinical implementation of digital preoperative implant designs.

[Key words] surgical area mouth opening; three-dimensional position blocking; clinical decision making

[收稿日期] 2025-12-31
[基金项目] 四川省科技厅项目（2025ZDZX0048）
[第一作者] 于海洋，教授，博士，E-mail：yhyang6812@scu.edu.cn
[通信作者] 于海洋，教授，博士，E-mail：yhyang6812@scu.edu.cn

理想的种植体位置是保障其正常发挥功能、维持长期稳定的基础[1-4]，目前已有各种手段能够综合解剖因素、修复条件等情况，实现对种植体位置的术前虚拟设计，并根据设计位置的精度需求选择种植引导方式[5-8]。但鲜有系统性的方案全面地讨论种植体设计位置的手术可及性问题，即在现有的开口度大小、缺牙间隙大小、颊舌软组织等解剖条件下，受所选种植体长度、种植器械长度与几何尺寸、种植引导方式等的限制，术者是否能顺利地按术前预设位置及轴向预备种植窝，并植入种植体？

具体而言，牙种植手术主要包括种植窝预备与种植体植入2个过程，每个过程均包括2个阶段，具体如下。1）器械就位阶段：在口外装配完成的种植器械，按照预设位置和轴向在种植位点上方就位的阶段；2）器械工作阶段：器械按照预设轴向从种植位点逐步深入组织内，直至抵达工作长度的阶段。上述过程中，均可能出现手术器械受解剖结构或其他装置的限制，发生三维空间位置阻挡，即三维空间位阻（three-dimensional position blocking）[9]（简称“空间位阻”“位阻”），影响手术的顺利实施。

本文基于前期提出的“种植术区开口度（surgical area mouth opening，SO）”新概念及其分类体系[9]，围绕器械就位、器械工作2个阶段，进一步展开对种植术中空间位阻的几何分析，通过定义一系列关键几何量及其测量方法，探讨器械长度选择的临床路径，进而基于所选的器械计算不同引导方式所需术区开口度（guiding-required mouth opening，GO），全面分析判断虚拟设计位点及手术方案的可及性。

1　种植术中的空间位阻及其与器械长度的关系

1.1　引发空间位阻的距离分类

三维空间中的物体必然占据一定量的几何空间，当物体间发生碰撞接触时，受物体本身形变能力的限制，相互之间会出现位置阻挡，妨碍其原本的运动，即出现了空间位阻。种植术区包含周围邻牙、牙龈、颊舌软组织等固有解剖结构，以及种植手术导板、口镜、拉钩等器械装置，这些物体间的距离与空隙，则是种植手机与种植钻的运作空间。如果空隙距离小于手术器械的几何尺寸，则会引发空间位阻。本文将引发空间位阻的距离按照柔性可调与刚性固定的性质分为2类，其特点、临床场景与调节方法见表1。

表 1　引发空间位阻的距离分类

Tab 1　Classification of distance causing position blocking

距离分类	临床场景	特性	调节方法
柔性可调距离	纵向术区开口度；横向口角牵拉程度	无损可调	主动张口（可能引发疲劳）；外力牵拉（可能引发不适）
刚性固定距离	邻牙间的距离；导板与邻牙/骨面的距离	不可逆调节	正畸、邻面调磨（微创）；调磨种植导板

1.2　器械就位阶段的空间位阻

在器械就位阶段，若种植器械长度过长，器械可能被对颌解剖结构阻挡，无法按预设轴向就位至种植位点上方，发生空间位阻（图1）。

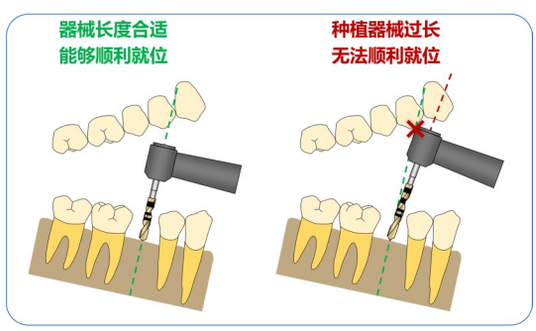


图 1　器械就位阶段的空间位阻

Fig 1　Three-dimensional position blocking during instrument placement

笔者曾提出SO、GO的概念及其分类[9]。SO指种植术区牙龈平面上拟植入位点中心沿拟植入种植体轴向到对颌软/硬组织最高点间无阻挡的间距，具体包括：1）术区被动开口度（maximum surgical area mouth opening，MSO）；2）术区自由开口度（freely surgical area mouth opening，FSO）；3）术区舒适开口度（comfortably surgical area mouth opening，CSO）。分别代表患者被动最大张口、自主最大张口、可维持稳定张口时的SO，一般而言，MSO>FSO>CSO。

GO指植入工具需要的无阻碍的最小垂直空间高度。根据手术的引导方式可分为[9]：1）徒手种植术区所需开口度（freehand-guided mouth opening，FGO）；2）C型管口导板术区所需开口度（C-template-guided mouth opening，CGO）；3）柱型管口导板术区所需开口度（parallel-columnar-template-guided mouth opening，PGO）。本文将装配好的种植器械的总长度定义为H，GO的大小与所用器械长度H、导板的设计及使用方式密切相

关，对于徒手或使用C型管口导板引导手术时，FGO和CGO等于所用种植器械的总长度H；而使用柱形管口导板时，PGO通常需要在H的基础上增加导板距牙龈平面的增高量。

若患者的MSO小于某种手术引导方式的GO，则说明不能使用该引导方式完成手术，而FSO与CSO则分别决定患者能否在自主大张口或舒适张口下完成手术，一般当GO>FSO时不推荐进行种植手术[9]。

1.3　器械工作阶段的空间位阻

器械工作阶段包括种植窝预备与种植体植入。受术区解剖结构或导板的空间限制，在器械工作阶段，可能存在以下3种情况（图2）。1）不存在空间位阻：器械按照预设位置及轴向逐步深入骨内，顺利抵达工作长度，期间除切削骨组织及种植体植入扭矩阻力以外，不存在任何阻碍。2）种植机头发生空间位阻：器械尚未抵达工作长度时，若所选器械的工作端长度过短，可能导致种植机头被邻牙或导板阻挡，从而使器械无法继续深入。此类位阻多发生于前牙、缺牙间隙较小的后牙或植入位点距邻牙较近时，由于引发此类位阻的距离是刚性固定的，没有调节空间，因此只能换用更长的器械或调磨邻牙以解除位阻。3）种植机手柄发生空间位阻：器械尚未抵达工作长度时，种植机手柄被牙列或导板阻挡，导致器械无法继续深入。此类位阻多发生于后牙种植时，位于口腔前份的牙列或导板可能阻挡手柄。由于此时的位阻由柔性可调距离引发，常优先通过旋转手柄、挤压口角，改变手柄位置以解除位阻；但对于种植位点靠后、颊脂垫肥厚、硬皮病等患者，口角软组织牵拉耐受度较差时[10-11]，手柄的旋转角度受限，无法彻底解除位阻，此时只能换用更长的器械。

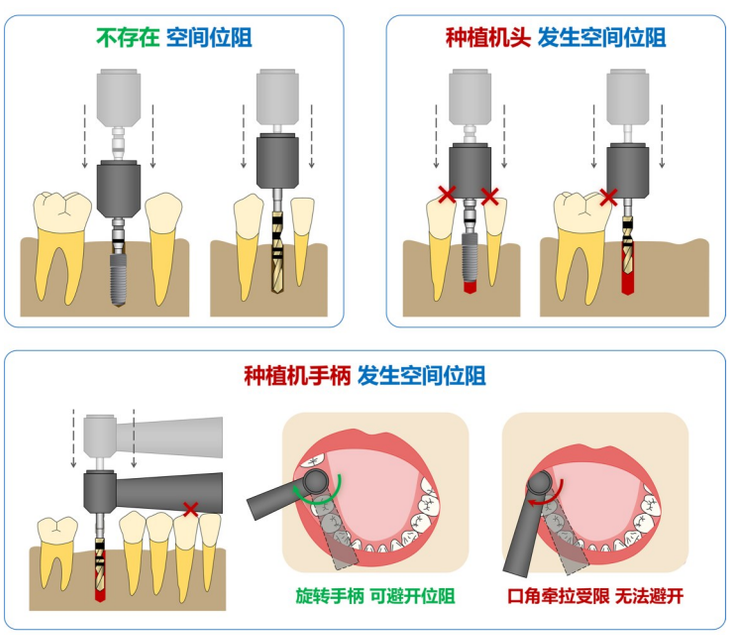


图 2　器械工作阶段的空间位阻

Fig 2　Three-dimensional position blocking during instrument working

1.4　器械长度与空间位阻的关系

据前文讨论可知，种植器械的总长度H是影响种植手术可及性的关键因素之一。器械就位阶段，SO及不同种植引导方式的GO决定了H的上限H_{max}，过长的器械则无法顺利就位；器械工作阶段，机头或手柄与周围结构的位阻决定了H的下限H_{min}，过短的器械则无法抵达工作长度。只有当$H_{min}\leqslant H_{max}$，且现有种植工具中存在满足$H\in[H_{min}, H_{max}]$的器械时，才能保证种植手术能够按预设位置顺利进行。

因此，受患者SO的限制，种植器械长度选择的原则为：在能顺利抵达工作长度的前提下，尽可能选择较短的器械。下面介绍H的测量与计算方法。

1.4.1　种植窝预备器械的长度

种植窝预备器械包括种植手机与各类种植钻。种植钻通过钻针柄连接至种植机头，完成装配。种植窝预备器械的长度计算公式：$H_{备洞}=L_{机头}+DAH$。定义几何量：$H_{备洞}$为种植窝预备器械的全长；$L_{机头}$为种植机头顶面距底面的垂直距离；DAH为钻针装配高度（drill assembly height），是种植钻尖端到种植机头底面的垂直距离（图3）。

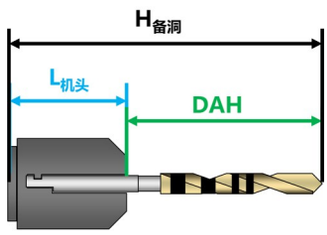


图 3　种植窝预备器械长度的测量与计算

Fig 3　Measurement and calculation of implant socket preparation instrument length

1.4.2　种植体植入器械的长度

根据植入手段的不同，可将植入工具分为机动植入和手动植入2类，分别使用种植手机或棘轮扳手作为动力源。此外，不同种植系统之间，连接种植体与动力源的工具不同，例如Straumann系统使用适配器与携带体2个部件连接，而Dentsply Astra系统则使用种植体驱动杆1个部件连接。本文将连接种植体与动力源的工具合称为持钉器，种植体通过持钉器与机头或棘轮连接。

种植体植入器械的长度计算公式：IAH=HID+$L_{植体}$，$H_{植入}$=($L_{机头/棘轮}$+IAH)=($L_{机头/棘轮}$+HID+$L_{植体}$)。定义几何量：1）$H_{植入}$为装配好种植体的植入工具的总长度；2）$L_{机头/棘轮}$为种植机头或棘轮的顶面距底面的垂直距离；3）种植体装配高度（implant assembly height，IAH）指种植体尖端到种植机头或棘轮底面的垂直距离，包括机头/棘轮-植体间距（handpiece/hand-rachet implant distance，HID）和$L_{植体}$2个部分；4）HID指机头或棘轮底平面与种植体上口平面之间的距离，不同持钉器的HID不同；5）$L_{植体}$为种植体上口平面距种植体尖端的垂直距离（图4）。

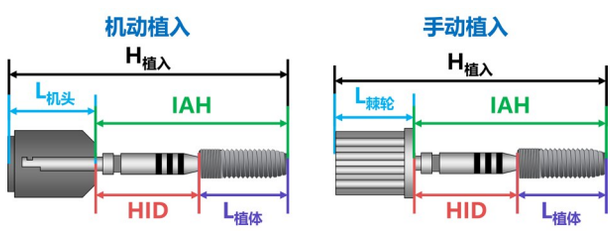


图 4　种植体植入器械长度的测量与计算

Fig 4　Measurement and calculation of implant placement instrument length

2　器械工作阶段空间位阻的评估

器械工作过程中，空间位阻主要来自于周围解剖结构或装置对器械的阻挡，妨碍器械沿植入轴向的深入。当机头出现位阻时，只能换用更长的器械来解除；当手柄出现位阻时，常首先通过旋转手柄、挤压口角以避开阻挡，但受个体差异影响，可调节范围受限，若旋转仍无法解除位阻，则只能增加器械长度。因此，准确评估器械工作阶段的空间位阻，是确定最小器械长度H_{min}的关键。

2.1　机头位阻的评估

2.1.1　寻找机头空间位阻点的简化几何方法

为便于概念引入和计算，可将种植机头简化为标准的圆柱体，其底面是以P为圆心，r为半径的圆（⊙P）；植入长轴可简化为射线l，l的端点O即为目标工作长度的终点。由此，种植器械的工作阶段即可简化为：⊙P沿l从无限远处向O点移动的过程。期间，若机头的底面⊙P与邻牙或周围其他结构相交于B点，妨碍机头继续行进，则B点即为空间位阻点；若B点不存在，则说明机头不存在空间位阻（图5）。

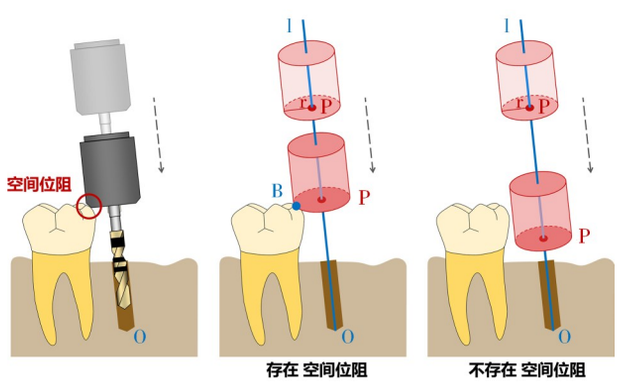


图 5　寻找机头空间位阻点的简化几何方法

Fig 5　Simplified geometric method for identifying the position blocking point of the handpiece head

根据上述简化模型，可以定义如下水平向几何量（图6），直接量化判断目标种植体位置下，种植机头与邻牙是否会发生空间位阻。1）邻牙-植入轴最小距离（adjacent teeth distance，ATD）指术区邻牙表面距植入长轴的最小三维距离；2）种植手机机头半径（implant handpiece radius，IHR）即种植机头底面简化圆形的半径r。

若ATD≥IHR，则B点不存在，种植机头不会与邻牙发生空间位阻；反之若ATD<IHR，则B点必然存在，此时若器械长度不足，则机头可能与邻牙发生空间位阻。

2.1.2　最小器械长度H_{min}的计算

根据ATD与IHR的数量关系，可判断机头是否会发生位阻。若机头与邻牙可能发生空间位阻，

即B点存在，则可基于B点的位置测量并计算最小器械长度H_{min}，只有当器械长度$H \geq H_{min}$时，才能确保器械能够无阻碍地抵达工作长度。相关的垂直向几何量的定义如下（图7）。1）DAH：指种植钻装配至种植机头后，种植钻尖端到种植机头底面的垂直距离。2）IAH：指种植体通过持钉器与机头或棘轮连接后，种植体尖端到种植机头或棘轮底面的垂直距离。根据1.4.2中的定义，$IAH=HID+L_{植体}$，当种植体长度固定时，IAH的大小由HID决定，不同持钉器的HID不同。3）位阻点-钻孔尖端深度（block point-socket depth，BSD）：指空间位阻点B沿植入方向上距离目标钻孔尖端的深度。4）位阻点-种植体尖端深度（block point-implant depth，BID）：指空间位阻点B沿植入方向上距离目标种植体尖端的深度。

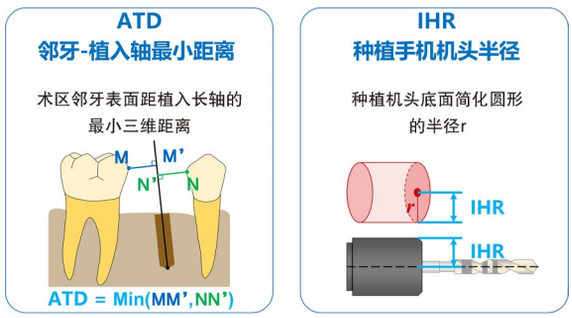


图 6　判断机头位阻的水平向几何量

Fig 6　Horizontal geometric parameters for handpiece head position blocking assessment

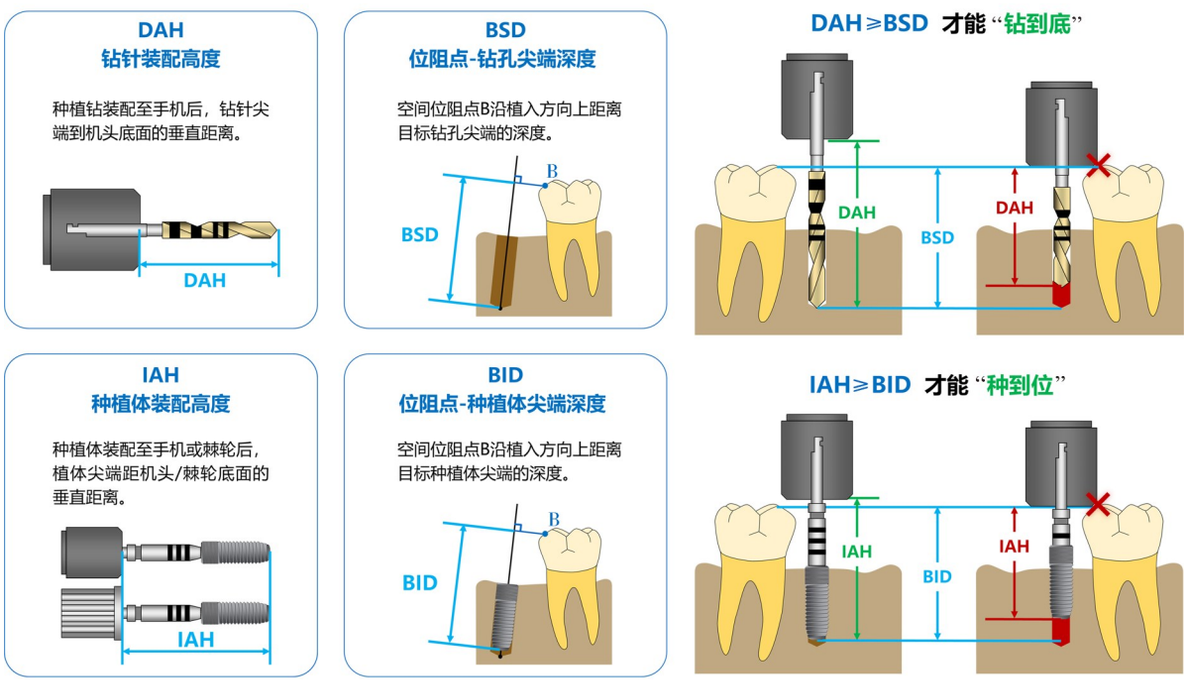


图 7　计算最小器械长度H_{min}的垂直向几何量

Fig 7　Vertical geometric parameters for minimum instrument length calculation

实际种植手术中，为补偿钻针尖端与植体尖端的几何形态差异，防止种植体根尖部的压迫，钻针在根尖区通常有1 mm的额外预备量，因此BSD与BID的长度略有不同。

当B点存在，即机头可能发生位阻时：对于种植窝预备阶段，应满足所选种植钻的DAH≥BSD，才能确保种植钻顺利到达工作长度；对于种植体植入阶段，应满足所选持钉器的HID与种植体长度$L_{植体}$之和大于BID，即IAH≥BID，才能保证种植体植入到目标位置。

当B点不存在，即机头不会发生位阻时：种植器械的DAH与HID只需满足所选种植体的植入深度需求即可。

种植工具盒中常配备不同长度的种植钻及持钉器，对应的DAH和IAH也不相同。根据DAH与BSD、IAH与BID的数量关系，即可确定DAH与IAH的最小值DAH_{min}与IAH_{min}，选择相应的种植器械，并根据1.4.1及1.4.2中H的计算公式，得到避开机头位阻的最小器械长度，具体如下。种植窝预备阶段：$H_{min}=L_{机头}+DAH_{min}$；种植体植入阶段：$H_{min}=L_{机头/棘轮}+HID_{min}+L_{植体}=L_{机头/棘轮}+IAH_{min}$。

2.2　手柄位阻的评估

对于种植位点靠后、口裂较小、颊脂垫肥厚、硬皮病等口角难以牵拉的患者[10-11]，种植机手柄的活动范围有限，常需从前牙区伸出，因而容易出现手柄与前牙的位阻。此外，如果前牙区切缘被

导板覆盖，则更易发生手柄的空间位阻。

然而，种植机手柄形态各异、粗细不同，且手柄与机头仰角存在差异，无法将手柄抽象成标准几何体。此外，手术时术者可通过“旋转手柄-挤压口角-器械深入-微微闭口”的方式反复循环，不断调整手柄角度，尽可能减少手柄的位阻，而不同患者口角的牵拉耐受度差异大，因此难以预测可能发生空间位阻的点，也就无法直接测算所需的最小器械长度。

根据2.1中对机头位阻的评估，已得到避开机头位阻的H_{min}，进而可以基于该H_{min}来预测手柄的位阻情况。在此，本文提出一种通过CAD软件寻找避开空间位阻的手柄摆放位置的方法（图8）：1）根据2.1中的器械长度H_{min}，在种植手机三维模型上装配相应长度的器械；2）将器械沿植入长轴对齐到目标种植体位置的工作终点，模拟器械到达工作长度的时刻；3）观察手柄与牙列或导板的空间交叉情况，若手柄与其他模型发生重叠，则说明该手柄摆放位置存在空间位阻；4）绕植入长轴旋转手柄，记录所有未出现模型重叠的手柄摆放位置与旋转角度，评估这些位置是否能在患者口内实现。当手柄沿牙列从前牙区穿出时，口角软组织产生的位阻较小；而当手柄向患侧偏转并与牙列呈较大夹角时，口角软组织则可能拉伸至极限，从而产生较大的空间位阻。实际临床中，可在术前向患侧最大程度牵拉口角，记录此时手柄与牙列所能形成的最大夹角，以判断患者软组织位阻的极限情况，从而与CAD软件中模拟的位置比较。5）若模拟的手柄摆放位置超出患者软组织牵拉极限，则需增加器械长度后重新寻找，直至存在一个可以在口内实现的手柄位置，即为术中手柄的实际摆放位置，此时的器械长度即为避开手柄位阻的最小器械长度H_{min}。

值得注意的是，由于口角软组织产生的位阻具有柔性可调的特点，可能受到组织厚度与弹性、肌肉紧张程度、心理配合情况等众多因素的影响，因此上述基于术前极限牵拉测试的最大夹角，本质上是偏向临床实用性的半定量评估方法，旨在初步判定手柄在口内的可及性，以降低术中遭遇严重软组织阻挡的风险。如何对动态的软组织形变与三维阻力进行精确的量化计算与模拟，仍是当前空间位阻数字化评估中亟待突破的难题，有待未来建立包含动态软组织边界的三维虚拟仿真模型予以解决。

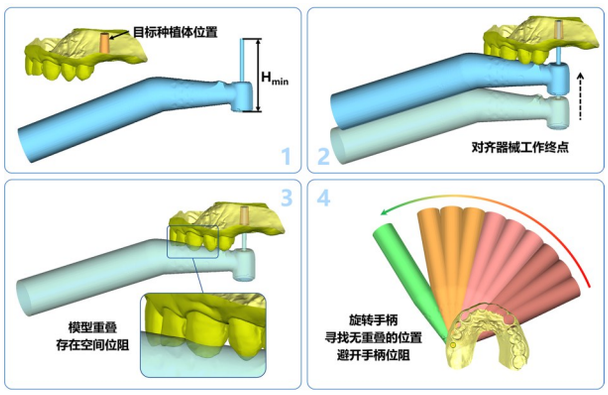


图 8 CAD软件寻找避开手柄位阻的摆放位置的方法

Fig 8 CAD-based method for identifying handpiece handle placement positions to avoid position blocking

3 器械就位阶段空间位阻的评估

根据前文的计算与评估，能够得到器械工作阶段的最小器械长度H_{min}，进而可以基于该器械长度，结合拟选择的种植引导方式，计算GO的大小，与患者的SO比较，评估各种引导方式的手术可及性。需要注意的是，由于SO测量的基准面是术区牙龈平面[9]，若手术采用翻瓣术式，种植器械在实际就位及工作时，基准面为骨面，因此在比较GO与SO时，需根据术式的不同，适当增加牙龈平面与骨面之间的软组织厚度T。即翻瓣手术时，GO应与SO+T比较；不翻瓣时，GO则与SO比较。

3.1 不同引导方式GO的计算

常见的种植手术引导方式包括[9]：徒手引导、C型管口导板引导、柱型管口导板引导，对应的术区所需开口度分别为FGO、CGO、PGO。得益于C型管口导板的C形开口，种植器械能够从侧面进入种植位点，无需额外的垂直向开口空间，因此C型管口导板或徒手引导种植手术时，FGO或CGO的大小与所选种植器械的总长度H相等；使用柱型管口导板时，要求器械从导板开口正上方垂直插入，因此需要额外的垂直空间，设牙龈平面与导板上口平面间的垂直距离为GH，则柱型管口导板的PGO=GH+H。

3.2 不同植入策略GO的计算

对于种植体植入过程，当只有较长的持钉器才能够避开机头或手柄的位阻时，所对应的GO也更高，对术区开口度SO的要求更大。然而，由于持钉器和种植体之间为可拆卸的活动连接，因此或能通过先后使用短、长持钉器接力植入，减小植入阶段的SO要求。下面以翻瓣术式下徒手植入

为例，讨论2种植入策略的GO计算方式，并比较其差异。

3.2.1　植入策略A：长器械一次性植入

当只有长持钉器才能避开位阻时，若直接使用该持钉器一次性植入（图9），设长持钉器的HID为HID_L，则植入策略A的GO_A计算公式为：$GO_A=L_{机头}+HID_L+L_{植体}$。

3.2.2　植入策略B：短-长器械接力植入

首先使用短持钉器植入种植体，直至器械发生位阻，再换用长持钉器，完成剩余部分的植入（图10）。植入策略B的GO_B包括2部分：1）使用短持钉器将种植体携带至种植窝正上方的GO_{B1}；2）将长持钉器放置在种植体正上方的GO_{B2}。二者之间的最大值即为GO_B。其计算公式如下（推导过程见图10）：$GO_{B1}=L_{机头}+HID_S+L_{植体}$；$GO_{B2}=L_{机头}+HID_L-HID_S+BBD+\beta$；$GO_B=\max(GO_{B1},GO_{B2})$。

上式中，β为持钉器插入种植体部分的长度；BBD为位阻点-骨面深度（block point-bone depth），指空间位阻点B沿植入方向上距离骨面的深度。

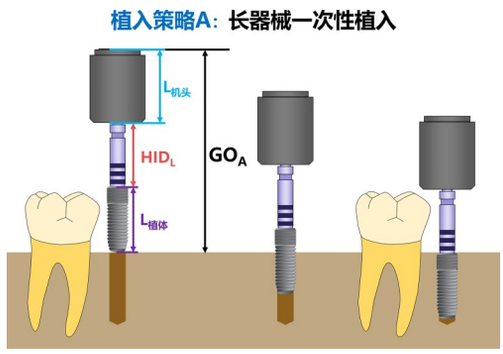


图 9　植入策略A：长器械一次性植入示意

Fig 9　Implantation strategy A: single-step long implant driver technique

3.2.3　2种植入策略的GO比较

对于上述2种植入策略，并非GO_B一定小于GO_A，二者间的大小关系存在一定条件。具体讨论如下。根据GO_A与GO_{B1}的计算公式：$GO_A=L_{机头}+HID_L+L_{植体}$，$GO_{B1}=L_{机头}+HID_S+L_{植体}$。

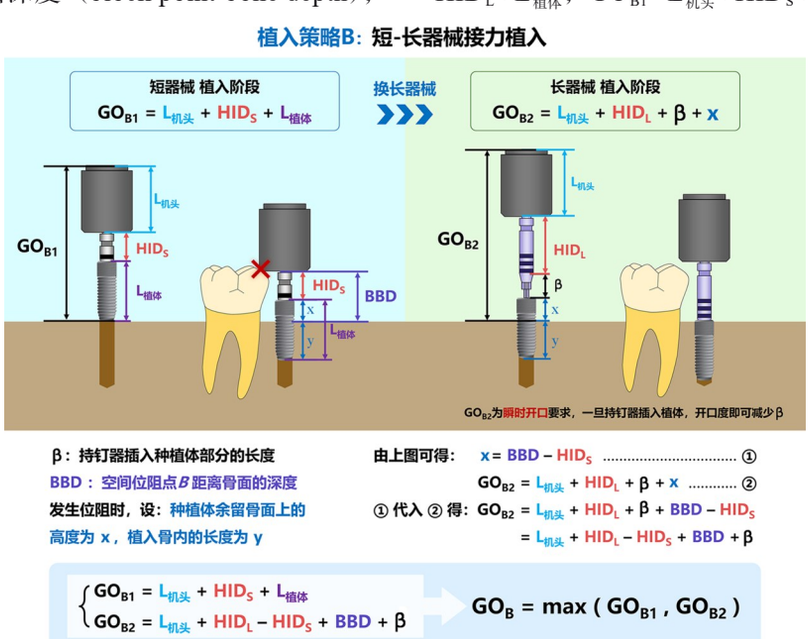


图 10　植入策略B：示意及GO_B计算公式推导过程

Fig 10　Implantation strategy B: sequential short-to-long implant driver technique and derivation of the GO calculation formula

由于$HID_S<HID_L$，易得：$GO_{B1}<GO_A$，因此GO_A和GO_B的大小关系取决于GO_A与GO_{B2}。令$\delta=GO_A-GO_{B2}$，代入GO_A与GO_{B2}的计算公式可得：$\delta=GO_A-GO_{B2}=(L_{机头}+HID_L+L_{植体})-(L_{机头}+HID_L-HID_S+BBD+\beta)=L_{植体}+HID_S-BBD-\beta$。

由图10可得：$y=L_{植体}+HID_S-BBD$，代入上式得：$\delta=y-\beta$。由此，当$y>\beta$，即$\delta>0$时，$GO_A>GO_{B2}$，植入策略B对开口度的要求更低；反之若$y<\beta$，即$\delta<0$时，$GO_A<GO_{B2}$，植入策略A对开口度的要求更低。

值得注意的是，当$GO_A<GO_{B2}$时，虽然GO_{B2}更大，但GO_{B2}为瞬时张口要求，一旦持钉器插入种植体内，开口度要求即可减少β，此时GO_B小于GO_A，二者差值为y；而若选择植入策略A，则要求患者在植入初期一直保持较大的张口度，舒适度稍差。综上，即便GO_B并非一定小于GO_A，但就术中舒适度而言，更推荐采用接力植入的策略。

3.3　SO新分类下患者术中舒适度评估的价值

除客观条件限制外，患者的张口动作可能受

到各种主观因素影响，因此SO并非恒定的唯一值，而是一个或大或小的数值范围。SO新分类将分为MSO、FSO、CSO，分别代表患者被动最大张口程度、自主最大张口程度、可维持舒适张口程度，一般而言，MSO>FSO>CSO[9]。临床上可通过实测或数字化手段等方法获得患者的SO大小范围，进而结合手术预估时长、患者张口耐受度、主观心理状况等，选择相应的SO与GO比较，评估手术可及性与舒适度。一般来讲，SO范围大时手术的可及性与患者的舒适度较好。但也要注意对于颞下颌关节紊乱病患者，长时间被动张口可能导致关节区疼痛甚至关节脱位[12]；而对于心理敏感、治疗恐惧或个性苛刻的患者，术中持续大张口可能导致焦虑恐慌难以配合治疗，甚至出现恶心呕吐的情况[13]，术后也可能发生潜在纠纷，此时选择FSO或CSO评估手术的舒适度，能够在一定程度上规避可能相关的风险。

对于术区所需开口度GO，随着术中器械的运动与更换，GO也在动态变化。本文根据术中器械对开口要求的持续时间与变化趋势，将GO分为如下3种类型（表2），不同持续时间的GO对术中舒适度有不同影响。

表 2 GO持续时间与变化趋势的分类

Tab 2 Classification of GO duration and change trends

GO变化趋势	原因	临床场景	舒适度变化
瞬时改变	暴露在口内的器械长度突然减小或增大	器械（如测深杆）快速就位；植入策略B中换长器械时；器械从窝洞中完整取出时	瞬时舒适度变差
持续下降	暴露在口内的器械长度持续减小	种植窝预备；种植体植入	舒适度逐渐增加
维持不变	暴露在口内的器械长度基本不变	旋紧基台、牙体预备	舒适度持续较差

4 器械长度与种植引导方式选择的临床决策路径

结合前文的讨论，可以整理出器械长度与种植引导方式选择的临床决策路径。1）以修复为导向，结合现有解剖条件，设计虚拟种植位点；2）根据ATD与IHR的大小，判断设计位点下，机头与邻牙是否可能存在空间位阻；3）若机头与邻牙不存在空间位阻，则选择满足植入深度需求的最短器械；若机头与邻牙可能存在空间位阻，则进一步测量BSD、BID，根据BSD与DAH、BID与IAH的大小关系，选择能够避开机头位阻的最短器械；4）在CAD软件中，根据第3点中选择的器械长度，模拟器械到达终末位置时的状态，寻找避开手柄位阻的手柄摆放位置，并评估该位置能否在患者口内实现；5）若第4点中的手柄位置旋转角度过大，超过患者口角牵拉耐受程度，无法在口内实现，则需增加器械长度，重新评估，直至手柄摆放位置合适；6）根据最终确定的器械长度，计算不同引导方式下的GO，并结合患者的张口耐受度、主观心理状况等，选择合适的SO与GO比较，从而选择种植手术引导方式；7）若第6点中所有的GO均大于患者的SO，则说明该设计位点无法在口内实现，应更改种植方案，重新进入决策路径；若多次尝试无解，则判断该患者因术区开口度受限，在现有条件下无法进行种植修复。

实际临床应用中，为快速判断现有SO对不同种植引导方式的可及性，可通过实测与计算，汇总特定种植系统在各种引导方式下、使用工具盒内最短器械完成手术时的最小术区所需开口度（minimum guiding-required mouth opening，GO_{min}）。该数值代表在无任何软硬组织空间位阻的理想解剖条件下，完成种植手术的术区开口度底线。

表3以Dentsply Astra Tech Implant System® EV和Straumann BLT骨水平种植体系列为例，列出了在上述理想条件下，基于特定型号的种植机头（Bien-Air，瑞士；实测$L_{机头}$=13.5 mm）装配最短器械后测得的GO_{min}示例值。由于不同型号手机尺寸各异且存在微小测量误差，此实测值仅供参考。

在临床初步评估时，若患者的SO小于某种引导方式的GO_{min}，即说明无法通过该引导方式完成种植；反之，若SO大于某种引导方式的GO_{min}，则仅代表患者具备了最基础的开口空间，此时仍需根据前文所述的决策路径（图11），详细评估术中可能存在的空间位阻，据此明确最终的器械长度与引导方式选择。

5 总结与讨论

随着数字化种植技术的发展，无论是静态种

植导板、动态手术导航，亦或是自主式种植机器人等手段，均能实现较高的引导精度[5-8,14-15]，然而，任凭种植引导技术如何演进，刚性的种植器械仍需在有限的术区三维空间内抵达目标位点，其路径受制于患者固有的解剖条件与开口能力。因此，基于SO分析可能存在的空间位阻，评估术前设计的种植位点的手术可及性，是各类手术方式均无法避开的话题。

本文系统探讨了种植术中的三维空间位阻，通过将手术过程拆分为器械就位与器械工作2个阶段，分别剖析其位阻的来源，进而建立空间位阻的简化几何分析模型，提出并定义了一系列关键几何参数，用以计算避开位阻的最小器械长度，得出器械长度选择的临床路径，最终基于所选器械评估种植引导方式所需的开口度，与患者现有开口度比较，为术前虚拟设计位点的手术可及性评价提供了算术依据与可操作的方法。

表 3　2款常用种植系统不同长度种植体对应的GO_{min}

Tab 3　GO_{min} for different implant lengths using two mainstream implant systems　mm

种植系统	种植体长度	FGO_{min}	CGO_{min}	PGO_{min}
Dentsply Astra Tech Implant System® EV	6	33	37.5	37.5+GH
	8	33	37.5	37.5+GH
	9	33	38	38+GH
	11	33	40	40+GH
	13	33	42	42+GH
	15	38	44	44+GH
	17	38	46	46+GH
Straumann BLT 骨水平种植体	8	35.5	37.5	37.5+GH
	10	37.5	39.5	39.5+GH
	12	39.5	41.5	41.5+GH
	14	43	43.5	43.5+GH
	16	43.5	45.5	45.5+GH
	18	45.5	47.5	47.5+GH

注：GH为牙龈平面与柱型管口导板上口平面间的垂直距离。

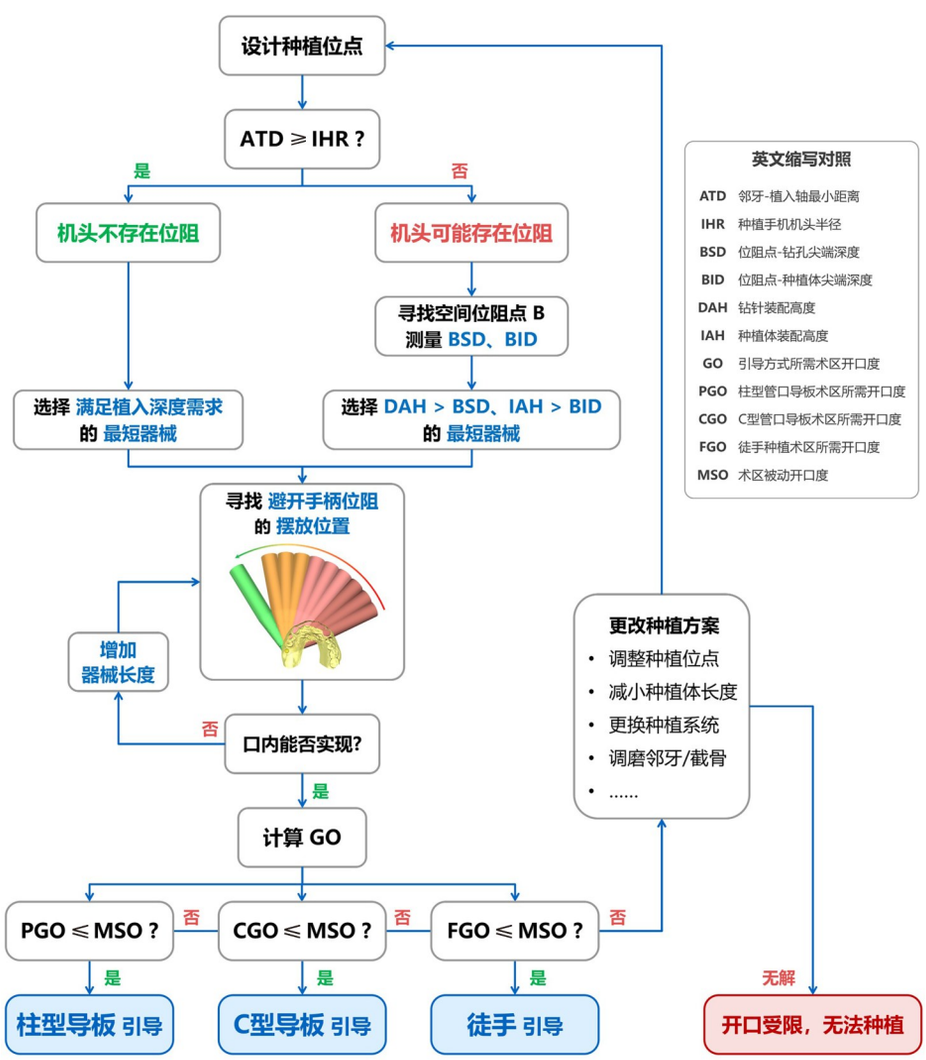


图 11　器械长度与种植引导方式选择的临床决策路径

Fig 11　Clinical decision-making pathway for instrument length selection and guidance method decision

本文提出的简化几何模型旨在围绕空间位阻点B，定义一系列相关的空间几何量，讨论其大小与位置关系，从而实现对空间位阻的算术分析。对器械与周围结构的简化（如将机头视作圆柱）虽利于理解，但仍与临床中多样的手术工具及复杂解剖形态存在差异。理想的空间位阻分析应结合患者的大张口三维模型、实际使用的种植器械模型，进行术前三维虚拟仿真手术，直观呈现预设植入位点下手术器械的空间位阻情况，以确认合适的器械长度与引导方式。但即便是在可视化的三维虚拟仿真手术系统中，本文提出的分析方法仍可以作为系统程序的底层逻辑。此外，对种植手术可及性的评价还应充分考虑术者操作习惯、术野遮挡等情况，这些因素同样影响最终的植入精度与修复效果[16-17]。值得强调的是，对于刚性固定距离引起的空间位阻（如邻牙或对颌牙位阻），虽然从纯几何角度可通过调磨天然牙来增加有效空间，但这必然伴随不可逆的生物学代价。在本文构建的临床决策路径中，更换器械长度或种植引导方式、调整种植体尺寸或三维位置等，均可作为优先调整策略，只有在穷尽上述手段仍无法满足可及性，且经过严格牙体牙髓安全评估与医患沟通后，才选择微创的邻牙调磨方案。这也进一步凸显了术前全面进行空间位阻几何评估的重要性：即通过精准的术前预判，避免术中为了强行就位而造成的非预期生物学损伤。

总体而言，本文为种植术前设计位点的手术可及性评估以及种植引导方式决策提供了分析思路，为数字化种植修复的临床实施奠定了算术逻辑基础。

利益冲突声明：作者声明本文无利益冲突。

[参考文献]

[1] Buser D, Martin W, Belser UC. Optimizing esthetics for implant restorations in the anterior maxilla: anatomic and surgical considerations[J]. Int J Oral Maxillofac Implants, 2004, 19 Suppl: 43-61.

[2] Parra-Tresserra A, Marquès-Guasch J, Ortega-Martínez J, et al. Current state of dynamic surgery. A literature review[J]. Med Oral Patol Oral Cir Bucal, 2021, 26(5): e576-e581.

[3] Katsoulis J, Pazera P, Mericske-Stern R. Prosthetically driven, computer-guided implant planning for the edentulous maxilla: a model study[J]. Clin Implant Dent Relat Res, 2009, 11(3): 238-245.

[4] 于海洋. 种植修复里的数字追问—从经验类比到数字引导[J]. 华西口腔医学杂志, 2021, 39(4): 386-397.
Yu HY. The question about the numerical value and quantitative data transfer of implant prosthodontics-orom experience guidance to digital guidance[J]. West China J Stomatol, 2021, 39(4): 386-397.

[5] Khaohoen A, Powcharoen W, Yoda N, et al. Accuracy in dental implant placement: a systematic review and meta-analysis comparing computer-assisted (static, dynamic, robotics) and noncomputer-assisted (freehand, conventional guide) approaches[J]. J Prosthet Dent, 2025, 134 (1): 91.e1-91.e25.

[6] Wu XY, Huang ZL, Liu BL, et al. Accuracy of implant placement with robotic surgery, dynamic navigation, fully static guide, and freehand surgery: a systematic review and network meta-analysis[J]. Int J Oral Maxillofac Implants, 2025. doi: 10.11607/jomi.11531.

[7] Shirani M, Emami M. Comparison between computer-assisted and freehand dental implant placement: a systematic review and meta-analysis[J]. Int J Oral Maxillofac Implants, 2026, 41(3): 359-370.

[8] Eftekhar Ashtiani R, Ghasemi Z, Nami M, et al. Accuracy of static digital surgical guides for dental implants based on the guide system: a systematic review[J]. J Stomatol Oral Maxillofac Surg, 2021, 122(6): 600-607.

[9] 于海洋, 吴嘉诚, 胡楠. 种植术区开口度新分类引导的种植引导方式临床决策[J]. 华西口腔医学杂志, 2023, 41(2): 134-139.
Yu HY, Wu JC, Hu N. Clinical decision making of implant guidance methods guided by new classification of surgical area mouth opening[J]. West China J Stomatol, 2023, 41(2): 134-139.

[10] Kumar B, Fernandes A, Sandhu PK. Restricted mouth opening and its definitive management: a literature review[J]. Indian J Dent Res, 2018, 29(2): 217-224.

[11] Dixit S, Kalkur C, Sattur AP, et al. Scleroderma and dentistry: two case reports[J]. J Med Case Rep, 2016, 10 (1): 297.

[12] Papoutsis G, Papoutsi S, Klukowska-Rötzler J, et al. Temporomandibular joint dislocation: a retrospective study from a Swiss urban emergency department[J]. Open Access Emerg Med, 2018, 10: 171-176.

[13] Randall CL, Shulman GP, Crout RJ, et al. Gagging and its associations with dental care-related fear, fear of pain

and beliefs about treatment[J]. J Am Dent Assoc, 2014, 145(5): 452-458.

[14] Fang T, Wang Y, Lou Y, et al. Flapless implant surgery using an intraoperative measuring guide with double-armed zirconia sleeves: a technical note[J]. J Oral Implantol, 2023, 49(3): 311-315.

[15] 王映凯, 解晨阳, 张煜强, 等. 分置式可测量种植导板在多颗前牙即刻种植即刻修复中的应用[J]. 华西口腔医学杂志, 2022, 40(6): 731-739.
Wang YK, Xie CY, Zhang YQ, et al. Application of measurable surgical guides in immediate implant placement and immediate restoration[J]. West China J Stomatol, 2022, 40(6): 731-739.

[16] Pellegrino G, Bellini P, Cavallini PF, et al. Dynamic navigation in dental implantology: the influence of surgical experience on implant placement accuracy and operating time. An *in vitro* study[J]. Int J Environ Res Public Health, 2020, 17(6): 2153.

[17] Schnutenhaus S, Wagner M, Edelmann C, et al. Factors influencing the accuracy of freehand implant placement: a prospective clinical study[J]. Dent J (Basel), 2021, 9(5): 54.

·专家简介·



于海洋，四川大学二级教授、博士研究生导师、一级临床专家，“国之名医”。长期从事口腔修复关键界面生物力学研究、数字化修复材料与工艺研究，擅长数字化精准修复、美学与咬合功能重建以及复杂疑难病罕见病的修复重建等。现任国家口腔医学中心口腔修复联盟主任、中国口腔医学技术联盟理事长、中华口腔医学会口腔修复专业委员会前任主任委员、口腔修复国家临床重点专科负责人、国际牙医学院院士。主持国家级及省部级科研项目40余项，发表高水平学术论文近300篇，入选“中国高被引学者”及“全球前2%顶尖科学家”。主编、参编规划教材与专著40余部，获授权国际与国家专利120余项，主笔或参与制定国家、行业及团体标准14项。

（本文编辑　杜冰）