

饲料配方基础和关键点， 兼议目标规划在饲料配方中的应用

熊易强

1 饲料配方基础和关键点

目前饲料界普遍采用的最低成本饲料配方模型,也是最基本的配方模型,是以单位(千克或吨)饲料成本最低为目标函数,在已知原料营养成分和给定的饲料原料市场价格情况下,根据线性规划原理,借助计算机求解满足所设定的约束条件下的“最佳”配方。

线性规划(LP)是最优化问题中重要的领域之一,很多运筹学中的实际问题都可以用线性规划问题来表述。在约束和目标都既定的前提下,如何优化整个系统,以最小输入得到最大输出,是线性规划的主要研究内容。线性规划在经济学、管理学及各个技术、经济领域中均有广泛应用。线性规划是应用数学的一个专门领域,有关其原理和算法的深入讨论已不属本文范围,读者如有兴趣,可查阅有关专著。但笔者在此需要指出两点:第一,用线性规划解决实际问题的模型的目标函数和约束条件的约束值或右侧常数(RHS)必须是线性的,如模型本身不属线性,则只有将原始模型转变为线性模型,才能按线性模型算法求解。第二,线性规划是一个十分有力的工具,但它不能取代实际问题的内涵。许多实际问题是经过简化后,再建立的线性规划模型,因此该线性规划模型解所提供的信息,未必全适用原实际问题的具体分析。

用于求解最低成本配方的线性规划的基本模型表述如下:

1) 目标函数

$$\min f(c_1X_1, X_2, \dots, X_n) = c_1X_1 + c_2X_2 + \dots + c_nX_n \quad (1)$$

式中: X_1, X_2, \dots, X_n ——各原料及其在配方中所含比例(%), $X_1 + X_2 + \dots + X_n = 100\%$;

c_1, c_2, \dots, c_n ——各原料的单价。

2) 约束条件

① 营养约束条件

$$a_{i1}X_1 + a_{i2}X_2, \dots, a_{in}X_n \begin{cases} \leq \\ \geq \end{cases} b_i, i=1, \dots, m \quad (2)$$

熊易强,饲料科技国际顾问,博士,教授,100091,北京市圆明园西路88号院17楼4单元401。

收稿日期:2007-02-26

式中: $a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}$ ——营养成分 i 在各原料中的含量。

② 饲料原料约束条件

$$X_1, X_2, \dots, X_n \begin{cases} \leq \\ \geq \\ = \end{cases} d_j \text{ 或 } \text{urs}(\text{无约束}) \quad (3)$$

$$X_1, X_2, \dots, X_n \geq 0$$

在饲料配方或线性规划的文献中,模型表述一般不包含式(3)。但在饲料配方的实践中,对饲料原料(使用量)的约束条件十分重要,笔者认为应将其列入基本模型之内。

市售饲料配方软件,甚至通用线性规划求解软件如 EXCEL 的“规划求解”软件,均可迅速准确地筛选出给定条件下的最低成本配方。至于配方的优劣或使用效果的好坏,则全在于约束条件的设定是否得当和所提供的饲料原料的数据(如营养成分)是否准确。

饲料配方的约束条件包括对营养成分的约束和对饲料原料的约束两个方面。一方面,约束条件设定的愈多,可供选择的机会愈少,或选出的配方成本愈趋于上升;另一方面,对于必需的约束条件不予设定,则达不到预期的饲料质量和饲养效果。因此,设定约束条件的基本原则是:对非必需的约束条件绝对不设;对必需的约束条件一定要设。总之,计算机配程序本身是一个忠实高效的“奴隶”,它只是执行“主人”也就是营养配方师的“指令”,即求解约束条件下的最低成本配方。至于所得到配方的优劣或使用效果则完全取决于“主人”所给的“指令”,即约束条件是否得当。由此可见,营养配方师的学识与经验以及对有关信息的掌握,对饲料配方的质量与效果起决定作用。深入研讨不同畜禽品种的营养需要和配方技术,已不属本文范围。此处介绍的是笔者对饲料配方的基本认识与经验体会。

营养成分的约束包括对有效能量、蛋白、氨基酸、各种矿物质、维生素等的约束设定。对于配方营养成分约束的设定,可参考有关饲养标准。需要指出的是,“饲养标准”一词用语并不确切,它仅仅是设定饲料配方营养成分的指南,而绝非必须执行的“标准”。一些国家采用“营养需要(nutrient requirements)”一词,并在文中明确指出,所提供的信息仅作为指南。例如美

国 NRC 家禽营养需要一书中提出的产蛋鸡营养需要量是以每千克饲料含代谢能(ME)12.122 MJ 为基础,同时明确指出其它营养成分应随代谢能设定的改变而相应调整。在我国目前条件下,机械地按每千克饲料含代谢能(ME)12.122 MJ 这一水平配方,既不现实也不合算。比较合理的做法是以 NRC 的营养需要为基础,在较低的能量水平上,按比例设定其它营养成分的约束水平。实际工作中经常遇到的一个问题是,按 NRC 蛋白与能量的比例关系所设定的蛋白水平与市场上所见产品比较总是偏低。对此应从两个方面分析:一方面,NRC 提出的蛋白质需要量是按美国典型的玉米-豆粕日粮,根据氨基酸供应量得到满足并相对平衡的基础提出的,同时饲料数据库有关氨基酸的资料也比较完整可靠。在我国配方中可能含有较多有效营养成分不够稳定的饼粕类或其它加工副产品,同时饲料数据库某些方面可能尚不够完善,营养师提出较大的安全系数,往往是必要的。另一方面,则是出于满足用户心理或市场销售的需要。饲料法规要求标明蛋白含量,但不要求标明有效能量浓度。粗蛋白分析简易快速,而有效能量测定则需要动物实验。尽管有一些体外测定方法或根据常规分析推算有效能量的回归公式,但尚未普遍用于生产。长期以来饲料用户存在着“只认蛋白不认能量”的观念,这也是导致市场上出现高蛋白-低能量配方这一不正常现象的重要原因。蛋白对能量的比例过高造成蛋白饲料资源浪费,增加环境污染,而且从两个方面导致配方成本增高:①蛋白饲料原料价格一般高于淀粉类能量饲料原料;②蛋白饲料原料能量浓度一般低于能量饲料原料,其所占据的配方空间往往迫使计算机选入价格高昂的油脂类高能量饲料原料来满足配方的能量需要。如何解决饲料配方的科学性和习惯势力及客户心理的非科学性之间的矛盾,这的确是饲料销售和技术推广上普遍存在的一个问题。原则上说,一方面要适应市场的现实,一方面要不断说服教育用户采用科学配方。结合技术讲座,通过典型示范让客户目睹新技术及科学配方的好处,可能是一个有效的办法。

至于营养成分约束条件的具体内容以及详细程度,则很大程度上要由饲料原料所提供的信息和对象动物而定。例如,许多试验均证明,用“有效氨基酸”配方的效果好,但如果饲料成分表中没有或没有可靠的氨基酸有效性的信息,用有效氨基酸配方就没有意

义。可能出现的另一问题是,营养师未将参选原料的相关营养成分如实地输入。这必然会影响线性规划模型的优化结果。也就是说,计算机根据不真实的信息所筛选出的配方,实际上并非该配方约束条件下的最优配方。一个最常见的例子是在输入工业(化学合成或发酵)生产的氨基酸时未输入其所含的蛋白质和有效能量。市售的工业生产的氨基酸一般不列入饲料成分表,但需要在饲料配方优化中作为参选原料如实地输入所有约束条件所要求的信息。氨基酸的自身营养价值除氨基酸本身外还包含蛋白质和能量。例如,市售赖氨酸产品一般含 78%赖氨酸,其蛋白质含量,在忽略赖氨酸分子中 N 的实际比例情况下,按平均折算率 6.25 计,可定为 78%;市售 DL 蛋氨酸一般含 99%蛋氨酸,其蛋白质含量,可按同一分析,定为 99%。至于相应产品所含能量,可在其很高的消化率基础上做一个留有余地的估计。例如按 95%消化率推算蛋白质的消化能、代谢能等等。有人认为这类工业生产的氨基酸价格高,在配方中的添加量少,其对配方蛋白质及能量的贡献可以忽略。但根据配方运算的实际经验,输入蛋白及能量与否,会直接影响该氨基酸原料是否被选入配方。既然蛋白质和能量已经被列入为配方的(营养)约束条件,而氨基酸自身含有蛋白质和能量,不将这两项营养成分列入,就意味着没有向计算机提供该产品价值的真实信息,或者说低估了其影子价格(熊易强,2006)。

关于根据对象动物设定约束条件的问题,可以过瘤胃蛋白质或过瘤胃氨基酸为例加以说明。过瘤胃蛋白质或过瘤胃氨基酸的概念已用于反刍动物饲料与饲养,将其列入高产奶牛或快速生长的幼畜配方的营养约束条件中往往带来良好效果。但对于育肥牛、低产奶牛及干奶期母牛来说,则意义不大;因为瘤胃合成的微生物蛋白或氨基酸已可满足动物的需要。

饲料原料的约束指的是规定某种原料在配方中不得低于或不得超过多少或必须等于多少。对饲料原料的约束需要考虑的方面往往更多,包括饲料的安全性、营养特性、工艺特性、饲料原料的供应情况,以及客户心理或对产品的特殊要求等。出于饲喂安全考虑限制棉、菜籽粕等含毒饲料原料的用量已成为饲料界的共识。需要指出的是,原料的品种来源与加工方法的差别,对象动物的不同,以及营养师对安全系数的掌握分寸,均影响配方的约束量。对于菜籽粕在四大家鱼饲料中添加量的安全上限,仍尚无定论。添

加少量油脂可减少环模磨损,但一般说来,添加量超过 2%,在没有外喷涂设备的条件下,会明显影响颗粒饲料的稳定度(durability)。一方面,在配方中加入一定量的次粉或面粉则可提高颗粒稳定度,这与小麦淀粉的糊化特性和面筋蛋白的功能特性密切相关;另一方面,次粉作为一种加工副产品,其供应量和质量的稳定性往往较差,可考虑在配方中设上限或定量加入。饲料原料的工艺特性在饲料配方中的重要作用对于某些产品如液体饲料来说,尤为突出(Xiong, 2006)。

营养学研究已经证明,对于大多数畜禽饲料的配方来说,通过补充必需氨基酸(如赖氨酸、蛋氨酸)、维生素(如维生素 B₁₂)及微量元素(如硒)实现必需营养成分平衡,可以用豆粕或其它饼粕类产品取代鱼粉。但不少饲养户根据他们的传统习惯或经验,总希望在购入的配合饲料中有一些鱼粉。一方面,鱼粉的市场价格往往高于其“影子价格”(熊易强, 2006)。为了销售的需要,营养配方师就要将鱼粉设定为一项饲料原料约束条件(例如设定鱼粉在配方中 $\geq 1\%$),迫使计算机将其纳入配方。另一方面,鱼粉的市场价格个别情况下也出现过短暂的下滑,显著低于其影子价格。例如,某年的几个月内,在不设上限的条件下,计算机可在禽料配方中入选 7%~8%的鱼粉。也就是说,在当时的市场条件下,采用计算机选定含 7%~8%鱼粉的配方成本最低。但笔者对有关饲料公司当时提出的建议是:限制鱼粉在配方中的加入量不超过 2%~3%。理由是:①鱼粉在世界范围内属短缺资源,当时的价格下滑必定是一个十分短暂的现象,近期内极可能回升。饲养户如习惯于使用高鱼粉日粮,届时将可能迫使饲料配方成本上升或因鱼粉在配方中的含量急剧降低而影响销售或畜禽采食。②配方中鱼粉过多,往往会导致畜产品出现明显的鱼腥味。与此同时,作者还建议,在资金和贮藏条件许可的情况下,尽量多购入一些鱼粉,以便鱼粉价格上涨时自用或出售。就此处所举鱼粉一例而言,考虑到各方面的因素,包括客户传统习惯对鱼粉的需求及对市场动态的分析,可对鱼粉的用量采取双向约束:约束条件设为 $\geq 1\% < 2\%$ (或 3%)。双向约束比之固定约束(如将鱼粉的用量定为 1%),可给计算机以较多机会降低配方成本。当然单向约束比双向约束降低成本的机会更多,而单向约束降低成本的机会又不如不设约束。往往需要设双向约束条件的还有钙。对钙设定下限是为了保证营养需要,设定上限的目的则是防止配方中钙含量过高而可

能引起的矿物质营养不平衡。石粉(碳酸钙)是最廉价的饲料原料,不设上下限,计算机在满足其它约束条件的情况下,会尽可能多地选用石粉,来实现“单位饲料成本最低”这一目标函数。

需要提及的是石粉这类矿物质原料在制粒作业上的特殊功能。尽管学术界存在不同见解,在生产实践中有厂家在畜禽生产的最后阶段如育肥的最后一周,从配方中撤掉全部维生素和矿物质添加剂以降低成本。但随即发现,按这类配方制作颗粒饲料时,环模总是打滑,颗粒难以从模孔中压出。在一次现场解难的技术服务中,笔者提出在配方中加入 2% 的石粉,这一问题随即得到了解决。美国大型一条龙养禽业的饲料厂往往专门选用含 21% 以上的磷酸二氢钙,理由是该产品比起含磷低(如含 17.5% 的磷酸氢钙)的产品可提高制粒产量。这对生产规模大的饲料厂的效益颇为重要。

预混料经常是以原料形式按固定量(例如 1%)设定约束条件。这是因为预混料经常是事先制作甚至定量包装好的,在配料工序中定量加入便于使用。至于各种微量营养成分和药物性添加剂的选择及在预混料中的含量则均由营养师专门设计。

最近美国 IOWA 大学的研究证明,提高配合饲料中粗纤维的含量,可显著降低粪便中氮的释放(Watt poultry e-news, June 22, 2006)。随着人们对环境污染的关注,这一发现或许会被营养配方师列入高度集约化饲养场的饲料配方的约束条件。

总之,在设定饲料配方的约束条件时,要从营养需要、原料特性与供应情况、加工工艺、产品销售以及资源环境等多方面因素加以综合考虑。对于不必要的或可设可不设的约束条件,决不要设;而对于必须设定的约束条件,则一定要设。设定哪些约束条件,约束量多少,单向约束还是双向约束,或是定量约束,都必须有充分的依据。一个合格的营养配方师,应当不断吸取动物营养学的新成果,不断丰富原料和加工工艺的知识,观察和研究市场的动态和需求,并将所有这些信息融会贯通,运用到饲料配方实践中去。一个学识丰富、功底深厚、经营观念强又熟悉市场的营养配方师,是饲料企业的一笔重要财富。笔者在本文中使用的“营养配方师”一词,是有意将营养师与配方师的功能集于一身。培养一个能操纵计算机软件的配方师,一般要求相当于高中毕业的程度,花费数周的时间。从大学毕业开始,培养一个动物营养硕士一般需要

2~3年,培养一个动物营养博士一般需要5~6年。配方师都是在营养师的指导下工作的,也有兼营养师与配方师于一身的情况。一个有规模有信誉的饲料公司往往规定,在公司品牌下的配方,必须经主管的高级营养师签字批准。

在以LP模型进行饲料配方优化过程中,偶尔会出现无解的情况。这时要找出相互冲突的约束条件,并相应地对其进行必要的调整。例如,美国一家饲料公司生产的一种乳猪料配方中尽管使用了优质粘合剂Lignin 2X(配方中用量为1%),仍然存在颗粒稳定度(PDI)低,含粉量过高的问题。经分析,该配方中外加油脂高达2.5%是PDI低的主要原因所在。笔者根据现有经验,在配方模型中增设油脂添加量约束 $\leq 1.5\%$, (并以5%的次粉取代1%的Lignin 2X,以提供较多的配方空间并降低成本),计算机随即显示出“无解”信号。这显然是由于配方所设营养约束的高能量($ME \geq 13.355 \text{ MJ/kg}$)与原料约束的油脂添加量($\leq 1.5\%$)之间的矛盾所致。笔者将ME的约束值逐步下调至 13.125 MJ/kg ,配方出现最优解。在较低的能量水平下,相应降低原配方中蛋白质、氨基酸的比例,对进一步降低成本提供了空间。制粒试验结果表明,新配方的PDI提高了7.4个百分点。随后的饲养试验表明,ME降低了 0.2299 MJ/kg 的新配方与原配方比较,对乳猪的生产表现无显著影响(日增重: $P=0.5051$,饲料转化率: $P=0.4519$),而且可以推断,乳猪饲养期间的微小差异可在生长育肥期间得到补偿(Xiong, 1995)。据此,可以从技术上认可这一新配方。但是还存在一个新配方能否被客户接受的问题。如果销售方面存在问题,可能的选择是:①将超过1.5%的油脂部分,通过“后喷涂”技术包被在颗粒表层;②增加Lignin 2X用量并相应地进一步提高油脂在配方中的添加量(Xiong, 1994)。这两个选择均将导致成本在原配方基础上增加。本例从分析排除配方无解到建立新配方的过程,再次说明了制定或修改一个饲料配方,必须从营养需要、加工工艺、产品销售等多方面综合分析,甚至要进行必要的试验研究。

饲料配方会依约束条件的改变而不同。即使约束条件不变,计算机选择的最低成本配方也会因饲料价格的改变而改变。需要注意的是,应避免配方的急剧变化。配方急剧改变不仅会影响销售,而且可能影响动物采食。一般来说,成年动物对饲料配方的变化更

为敏感,有时,仅仅是料型的改变也会影响进食。

建立并不断更新自己的饲料数据库对于确保配方质量、降低配方成本至关重要。公开出版的饲料成分表其数据所反映的是不同地区、不同年份的大量样品的平均值,因此每一数值都包含着品种(遗传)、地区(土壤、气候)、年份(气候)及种植条件(施肥、灌水...)等多种因素的变异。有的饲料成分表中注明了取得每个数据的样品数量和标准差,这样营养配方师就有可能以统计学为依据,通过提供安全系数对饲料的营养价值予以一定的保证,但为此所付出的代价往往较大。Nott和Combs(1967)建议在平均值基础上让出0.5个标准差(即平均数减0.5个标准差)作为线性规划配方的数据基础,其所提供的安全系数为69%(即69%的样品 \geq 平均值)。Routh等(1996)指出,用于线性规划配方的应是营养成分的变量(方差)即“标准差的平方”而不是标准差,其算法应是非线性的。以标准差为安全系数采用线性规划算法违背了“线性规划解决的实际问题的模型的目标函数和约束条件的约束值必须是线性的”这一前提,因而是不妥当的。其结果是,引入0.5个标准差按LP算出的为69%安全系数的配方(LP69)的安全系数,实际上是78%而不是69%。对于安全系数69%来说,是“配方过度(over-formulation)”,导致配方成本上升。用Zhang(1999)提出的非线性的随机规划模型(stochastic programming, SP)可以得到准确的安全系数为69%的配方(SP69),从而相应降低配方成本。但这只是规划模型应用是否恰当的问题或两种规划模型算法所得结果的差异问题。从产品销售上说,可以视为一个同一安全系数(或对客户的饲料营养成分的保证系数)下的配方成本的差异问题。SP以方差为衡量,较为客观地将饲料原料的变异作为评价饲料在配方中的实际价值纳入运算之中。但SP没有解决,也不可能解决原料营养成分本身的变异,以及由此导致的对动物生产表现的影响问题,或相应的配方成本上升的问题。也就是说,营养成分在产品中的变异(或标准差)愈大,为保证动物良好的生产表现而造成的配方成本上升的幅度愈高。因此减少饲料原料成分的变异对确保产品质量和降低成本至关重要。一个有规模、有信誉的饲料公司,应当对自己实际使用的饲料原料,尤其是主要的饲料原料的主要营养成分,进行分析化验,并逐渐建立自己的饲料原料数据库。较为切实可行的做法是,先从做好对主要原料

的常规分析着手,必需氨基酸或限制性氨基酸的含量,可根据常规分析结果,按比例以现有饲料成分表为基础推算。需要注意的是,有些新选育的作物品种类型,其蛋白质的氨基酸组成会有明显改变,简单的“按比例外推”会导致相当严重的误差。例如对于高油玉米来说,由于胚在籽粒中的比例上升,赖氨酸及其它必需氨基酸在蛋白质中的比例明显增加。用普通玉米蛋白质的氨基酸组成外推高油玉米的赖氨酸及其它必需氨基酸含量,显然过低估计了这些组分的实际含量或营养价值。最为理想的办法是,采用近红外等快速分析技术,对饲料原料成分进行在线分析,并据此对配方做相应调整。

2 关于在饲料配方中应用目标规划问题

有些饲料配方文献引入了多目标规划(multi-objective programming)中的目标规划(goal programming)以期帮助初学者避免 LP 配方模型出现无解面临的困惑,还有作者认为目标规划是“比 LP 更优越的方法,可以完全包容和取代”LP。对此,笔者认为值得商榷。

首先,多目标规划是针对单目标规划(single-objective programming)而言的。单目标规划指决策人面对的问题仅是一个目标函数;多目标规划面对的问题是决策人需要同时考虑两个以上目标函数。由于多个目标函数之间存在共同最优解的机会极微,决策人需要在各个单目标规划的最优解之间选取一个最佳的折衷可行解(范玉妹等,2004)。对于决策者来说,处理单目标规划问题比处理多目标规划问题简单,而 LP 又是单目标规划中最为简捷的规划模型。许多复杂的模型经过适当处理,都可以通过 LP 解决,这也是何以 LP 得到广泛应用的原因。用于处理多目标规划的数学方法,包括目标规划法,基本上都是先将多目标函数转化为单目标函数后再求解的数学规划模型。“目标规划法”模型的建立包括:①从原多目标规划模型中确定系统约束(刚性约束)和目标约束(柔性约束);②对各目标约束给予一个期望值并引入相关的偏差变量,包括正偏差 d_i^+ (有的文献用 p_i 表示)和负偏差 d_i^- (有的文献用 η_i 表示);③根据对期望值性质的分析,确定各目标约束的目标函数(达成函数)是 $\min d_i^+$ (如要求第 i 个目标允许低于其期望值但又要尽可能地避免超过期望值),还是 $\min d_i^-$ (如要求第 i 个目标允许超过其期望值但又要尽可能地避免低于其期望值),或是 $\min d_i^-, d_i^+$ (如希望偏差变量尽可能接近期望值);

④在建立优先等级或权系数基础上,以各目标约束的达成函数总和最小为模型的目标函数。这里笔者想指出一个语言翻译上的问题:英语中的 objective 和 goal 的中文翻译都用的是“目标”一词,但其英文本意完全不同。Objective 指的是在刚性约束条件下对面临的问题或目标函数求最优解: \max 或 \min , 因此可能出现无解的情况。Goal 指的目标规划法对柔性约束设立的期望值,其所面临的问题或目标函数是尽可能接近期望值($\min d$),因此一般说来不存在无解情况。

将 LP 的饲料配方模型转化为目标规划模型,是把原本是简单的问题复杂化。目标规划自身带有的灵活性和模糊性,对于解决简单的单目标问题,未必是优点。如模型建立不当,还可能出现不合理的配方,导致资源浪费,增加环境污染和配方成本。

目标规划模型在饲料配方上可能出现的建模不当问题包括:①把原本是依存变量关系的各营养成分作为独立变量处理;②未考虑目标约束单位的不同及同一单位不同营养成分约束对配方成本的影响在灵敏度上的差异(熊易强,2006);③目标规划模型中各目标约束间的优先等级安排不当。以下分两种情况进行讨论。

LP 存在最优解:如果将单位原料成本目标值的约束优先等级放在高于营养约束或与之相同的地位,同时又存在上述①、②两个问题,往往出现不合理的配方。只有在用目标规划法设定配方的单位原料成本目标期望值等于 LP 的最优解的单位饲料原料成本的条件下,目标规划法才可得到与 LP 相同的最优解。如目标规划法设定配方的单位原料成本目标期望值明显偏离(低于或高于)LP 的最优解,目标规划法得到的“最优解”,将不同于 LP 的最优解,所得到的配方会出现某些营养成分比例失调的情况,从而导致资源浪费,增加环境污染。因此,该目标规划模型所得到的“最优解”并非“事实上的最优解”。“事实上的最优解”只有一个,即 LP 的最优解。

如果将营养约束放在高优先等级,配方的单位原料成本目标值的约束放在低优先等级,由于原 LP 模型存在最优解,目标规划模型的“高成本目标”与“低成本目标”所得到的最优解,必与 LP 模型最优解无异。其目标规划模型的达成函数值,应分别为“高成本目标”与“低成本目标”的各自的期望值与 LP 解的目标函数值之差。

LP 无解: 这是一些作者在饲料配方中引用目标规划的初衷。至于应用目标规划解决 LP 配方模型出现无解问题的实例, 笔者在饲料企业的运作中尚未见到。如前所述, 当出现因约束条件相互冲突导致 LP 无解的情况时, 只要找出相互冲突的约束条件, 进行合理调整即可。

如果一定要采用目标规划, 就前面所举的为解决制粒质量而限制油脂添加, 导致配方无解的实例而言, 为了避免由于将各营养成分作为独立变量处理导致的配方营养成分比例失调的不合理情况, 应将能量及其它营养成分的约束作为依存变量(dependent variable)处理。具体地说: 设能量(如 ME, 偏差变量 d_1^- 、 d_1^+)与配方的单位原料成本(偏差变量 d_2^- 、 d_2^+)为目标约束(柔性约束), 能量目标值的约束放在高优先等级, 单位饲料原料成本目标值的约束放在低优先等级。至于其它营养成分, 则按与 ME 固定比例关系设为系统约束(刚性约束)。饲料原料约束, 也设为刚性约束。目标函数(达成函数)为 $\min d_1^-, d_2^+$ 。如此建立的目标规划模型的最优解, 应与通过合理调整约束条件的 LP 模型的最优解一致。但过程未免繁琐, 且不能取代相关的饲养试验和销售中需要探讨的问题及可能提供的选择。

对于优先等级的设定, 不应视为是绝对的。例如, 在饲料企业的运营中, 销售部门甚至企业领导可能对营养配方师提出要求: 设计一个单价尽可能不超过某一竞争对手, 而质量上又有明显竞争力的相应的饲料配方。如采用目标规划解决这一决问题, 可将配方的单位原料成本的目标约束放在能量(如 ME)优先等级之上。其它营养成分, 仍应按与 ME 固定比例关系设为刚性约束。为了减少配方优化的模糊性, 也可以将配方成本(从销售价格中扣除相关的包装、贮运、营销费及利润)设为唯一的柔性约束, 以竞争对手的相关配方成本为期望值, 偏差变量 d^-, d^+ , 目标函数 $\min d^+$ 或 $\min d^-, d^+$ 。依照其它营养成分与能量按比例挂钩的原则, 在预期对象动物的生产表现满意的前提下, 对能量给予双向约束, 按刚性约束处理。如目标函数(达成函数)定为 $\min d^+$, 当期望值落在能量浓度的双向约束值的配方成本之间时, 将出现一个从 d^- 到 $d^+=0$ 的可供选择的可行解域, 即一组成本不超过竞争对手的不同营养浓度的配方。当期望值落在能量浓度高限的配方成本以外或等于能量浓度高限的配方成本时, 则

只有一个可行解。如目标函数定为 $\min d^-, d^+$, 则不管期望值落在何处, 只有一个可行解。

当然, 这一问题完全可以用 LP 模型解决: 在上述营养浓度范围内, 用逼近法找出单价低于、等于或尽可能少超过竞争对手的配方。按以上原则所建立的目标规划筛选的配方和 LP 所筛选的配方应当是一致的。

写到这里, 笔者愿引用下面两句话: “模型建立的差异会导致不同的结果”; “建模的一条最重要法则是: 永远不要将自己限制起来”(Georgia Institute of Technology System Realization Laboratory)。

以单位饲料成本最低为目标函数的 LP 模型是当前饲料行业中应用最广的饲料配方模型。饲料饲养界目前使用的配方模型还有: 以(在其它营养成分按比例与能量挂钩的前提下)单位有效能(如 ME)配方成本最低为目标的参数配方(或最佳营养浓度配方)模型(Bushman, 1997; 吴金龙等, 2006), 以单位畜产品成本最低为目标函数的简化最大收益配方模型或以动物饲养过程的投入产出为基础的更为全面的最大收益配方模型(熊易强、裴鑫德, 1987)。这些模型本身都是非线性的, 但都只有一个目标函数。针对多目标问题的目标规划法对解决这些单目标问题似均不存在优势。事实上, 这些单目标非线性模型都是通过适当处理, 借助 LP 解决的。

随着人们对资源与环境关注的加深, 饲料配方的目标将不只限于求单一的“最低成本”或“最大收益”, 还要考虑与资源、环境有关的问题。例如, 对于一个资源限制型国家, 利用作物秸秆发展草食家畜生产, 除了“单位畜产品饲料费用最低”以外, 还有必要考虑“单位畜产品精饲料(或粮食)消耗最低”这一目标(孟庆翔等, 1990)。对于集约化经营的饲养业, 还需要考虑“粪便污染物排放最少”这一目标(Coelli 等 2006)。它们之间一般均不存在共同的最优解。这样一来, 饲料配方问题就成了多目标规划问题。处理多目标规划问题的一些数学方法包括目标规划法, 对于决策者选取最佳的折衷可行解, 并据此制定相关政策, 将是有帮助的。(致谢: 本文承蒙清华大学经济管理学院吴峨教授, 中国人民大学环境学院张象枢教授审阅, 并提供宝贵的评述意见。笔者在此表示诚挚的感谢。)

(参考文献 14 篇, 刊略, 需者可函索)

(编辑: 崔成德, cuiengde@tom.com)